一般環境標準（宇宙機）

平成２２年７月２８日　　制定

宇宙航空研究開発機構

免責条項

ここに含まれる情報は、一般的な情報提供のみを目的としています。JAXA は、かかる情報の正確性、有用性又は適時性を含め、明示又は黙示に何ら保証するものではありません。また、JAXA は、かかる情報の利用に関連する損害について、何ら責任を負いません。

Disclaimer

The information contained herein is for general informational purposes only. JAXA makes no warranty, express or implied, including as to the accuracy, usefulness or timeliness of any information herein. JAXA will not be liable for any losses relating to the use of the information.

発行

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

宇宙航空研究開発機構 安全・信頼性推進部

JAXA（Japan Aerospace Exploration Agency）

目次

1. 総 則 1
1.1 目 的 1
1.2 適用範囲 1
1.3 関連文書 1
2. 基 準 1
3. 自然環境 4
3.1. （欠番） 4
3.2. 雨とひょう 4
3.2.1 雨 4
3.2.1.1 統計値と解析 4
3.2.1.2 高度による降雨率の分布 6
3.2.2 ひょう 7
3.2.2.1 地上におけるひょう 7
3.2.2.2 高度によるひょうの分布 8
3.2.2.3 推 奨 値 8
3.3. 海塩粒子及び砂塵 11
3.3.1 海塩粒子 11
3.3.1.1 現在の状況 11
3.3.1.2 海塩粒子に対する配慮 14
3.3.1.3 試 験 14
3.3.2 砂 塵 14
3.3.2.1 現在の状況 14
3.3.2.2 砂塵に対する配慮 16
3.3.2.3 試 験 17
3.4. 湿度、菌及び大気汚染 20
3.4.1 湿 度 20
3.4.1.1 概 要 20

3.4.1.2 技術の現状 20
3.4.1.3 推　奨　値 24
3.4.2 菌 24
3.4.2.1 概　要 24
3.4.2.2 技術の現状 24
3.4.2.3 推奨値 28
3.4.3 大気汚染 29
3.4.3.1 概　　要 29
3.4.3.2 技術の現状 29
3.4.3.3 推奨値 35
3.5.　雷 37
3.6.　（欠番） 37
4. 誘導環境 37
4.1 概　　要 37
4.2 推　奨　値 38
4.2.1 製造、試験、ハンドリング環境 38
4.2.2 荷扱い及び輸送環境 38
付録Ａ　公共規格、標準等の規定の例 41
Ａ．１　公共規格、標準等の規定の例 41
Ａ．２　日本の宇宙プログラムでの規定の例 58

1. 総 則

1.1 目 的

この一般環境標準は、独立行政法人宇宙航空研究開発機構が開発する探査機及び人工衛星（以下「宇宙機」という）の一般環境性設計の基本的な条件を規定することを目的とする。

1.2 適用範囲

「一般環境」とは宇宙機及びロケットが製造、試験、輸送、打上げ準備中に受ける地上の自然環境並びに誘導環境、打上げ時、上昇中に受ける自然及び誘導環境を指す。本「一般環境標準」では、宇宙機（含む輸送用コンテナ）が設計上あらかじめ考慮すべき一般環境条件を示し、ロケット（含む輸送用コンテナ）については参考として記述する。

なお、打上げ環境のように、ロケットの運用により誘起される環境要素（ 熱、振動、減圧プロファイル等） についてはロケットのユーザーズマニュアルを参照すること。

宇宙機が軌道に投入された後に受ける自然及び誘導環境の条件については「宇宙環境標準」（JERG-2-141）を適用すること。

1.3 関連文書

(1) JERG-1－001 耐雷設計基準

2. 基 準

宇宙機及びロケットは、製造から打上げ並びに軌道上初期運用から寿命末期までの全運用期間（ サービスライフ） にわたって種々の環境に曝される。これらの環境はその性格上自然環境と誘導環境に区分される。

自然環境（ Natural Environment） は重力、大気、放射線、風、雷、降雨、太陽放射のように、宇宙機に無関係に自然に存在する条件であり、誘導環境（ Induced Environment）は、宇宙機又はそのシステムによって発生する条件、自然環境に対する宇宙機の応答によって発生する条件である。

両者ともサービスライフとして地上環境と宇宙環境が含まれ、地上環境は製造、試験、輸送、発射整備、打上げ上昇時の各フェーズ、宇宙環境は上昇時、衛星分離、遷移軌道、ドリフト軌道、最終軌道の各フェーズが対象となる。これらの各フェーズにおいて対象となる自然環境及び誘導環境の各要素をそれぞれ表2－ 1、表2－ 2 に示す。

宇宙機及びロケットの設計に当っては以上の環境要素を考慮する必要がある。

本書では一般環境のうち、3.2項から3.5項までは自然環境について、また3.7項では誘導環境について記載した。

表 2－1　自然環境

ロ： ロケット、工： 宇宙機

(*):「宇宙環境標準」（JERG-2-141）を参照のこと

環境要素	製造・試験	荷扱輸送 発射整備	打上	軌道上	項
風　地上風（～ 150m）		ロ	ロ		
高層風（～ 30km）			ロ		
雨	ロ	ロ	ロ		3.2
ひょう	ロ	ロ	ロ		3.2
海塩粒子	ロ	ロ			3.3
砂塵	ロ	ロ			3.3
大気汚染	ロ	ロ	ロ		3.4
菌	ロ・工	ロ・工			3.4
雷	ロ・工	ロ・工			3.5
大　気　空気の組成		ロ	ロ		
湿度（地表）	ロ・工	ロ・工			3.4、(*)
大気の性質	ロ・工	ロ・工	ロ・工	工	(*)
（温度、気圧、密度、音速）					
太陽活動サイクル				工	(*)
電磁放射			工	工	(*)
日　　照			ロ・工	工	(*)
太陽風				工	(*)
放射圧				工	(*)
地球放射			工	工	(*)
重力	ロ・工	ロ・工	ロ・工	ロ・工	(*)
雑　音　宇宙雑音			ロ	工	(*)
大気雑音			ロ	工	(*)
太陽雑音			ロ	工	(*)
地磁気				工	(*)
電離層　プラズマ				工	(*)
電場				工	(*)
宇宙線　バンアレン帯			ロ・工	工	(*)
太陽			ロ・工	工	(*)
銀河			工	工	(*)

メテオロイド、スペースデブリ				工	(*)
真空度			ロ・工	ロ・工	(*)

表 2－ 2　誘導環境

ロ： ロケット、工： 宇宙機

(*):「宇宙環境標準」（JERG-2-141）を参照のこと

環境要素	製造・試験	荷扱輸送 発射整備	打上	軌道上	項
空調 （温度、湿度、気圧、清浄度） 汚　染	ロ・工	ロ・工		工(*)	4.

3. 自然環境及び誘導環境

3.1. （欠番）

3.2. 雨とひょう

3.2.1 雨

3.2.1.1 統計値と解析

(1) 雨

気象学上、直径0.5mm 以上、落下速度3m/sec 以上の空から降る水滴、しかし、これより小さくても霧雨のように数が多くなく、パラパラ降る場合には雨とする。降雨量0.1mm 以上の日は降雨のあった日とする。[1)]

降水量の統計は水資源及び河川防災の観点から研究が進められており、多数の研究論文が発表されているが、その一つの10 分間降雨量の頻度を調べた結果では降水量と頻度の関係は指数関数でよく表現できる。[2)] また、日降水量の頻度分布も指数関数に近く、更に、尾を引く関係となり、ガンマ関数で近似できるとしている論文もある。[3)]

しかし、ロケットの設計上の対象となる雨は降水量が対象でなく、日降水量、1 時間降水量の極値がどの程度であるかということになる。一般に降水量の最大値と時間との間には、ほぼ次のような実験式が知られている。[4)]

$$I = Io\frac{131t}{1+0.31t}$$

I： t 時間降水量　Io： 地点あるいは場合によって異なる値

代表的な各地の降水量の極値を表3.2－ 1 に示す。

降雨量は地域および季節によって差があるため、雨のデータの適用に当っては、

このことに注意する必要がある。設計および試験のためには、降雨量よりも、降雨率が基準としてより多く用いられている。

降雨率 γ は次式で表わすことができる。

$$\gamma = \frac{C}{\sqrt{Dm}} \qquad (1)$$

ここで、γ ： 1 時間当り降雨率

Dm ： 降雨時間（ 分）

C ： 場所により決まる定数

表 3.2－ 1 各地の降水量の極値

地点	潮岬	大阪	京都	鹿児島	名瀬
２４時間	565mm	183mm	282mm	306mm	547mm
１時間	112	59	68	89	116
４０分	78	50	50	－	－
３０分	59	48	39	－	－
２０分	56	40	38	－	－
１０分	56	20	37	26	28

(2) 種子島の降雨率

統計開始年から1983 年迄の鹿児島、名瀬における日降水量、1 時間降水量、10 分間降水量の極値は表3.2－ 2 の如くなっている。[5)]

表 3.2－ 2 種子島近辺の降雨量の極値

	日降水量(mm)	1 時間降水量(mm)	10 分間降水量(mm)
鹿児島	306 （ 101）	89 （ 82）	26 （ 46）
名瀬	547 （ 89）	116 （ 88）	28 （ 47）

注： （ ） 内は観測年数を示す

また、種子島における1975～ 1984 年の10 年間における日および1 時間降水量の極値は、次の如くなっている。[6)]

	日降水量	1 時間降水量
種子島	256.5mm	89mm

(1)式に基づいて、米国主要基地の設計降雨率をlog－ log グラフで示したのが、図3.2－ 1 であるが、同時に種子島の10 年間の降雨率の極値を示した。

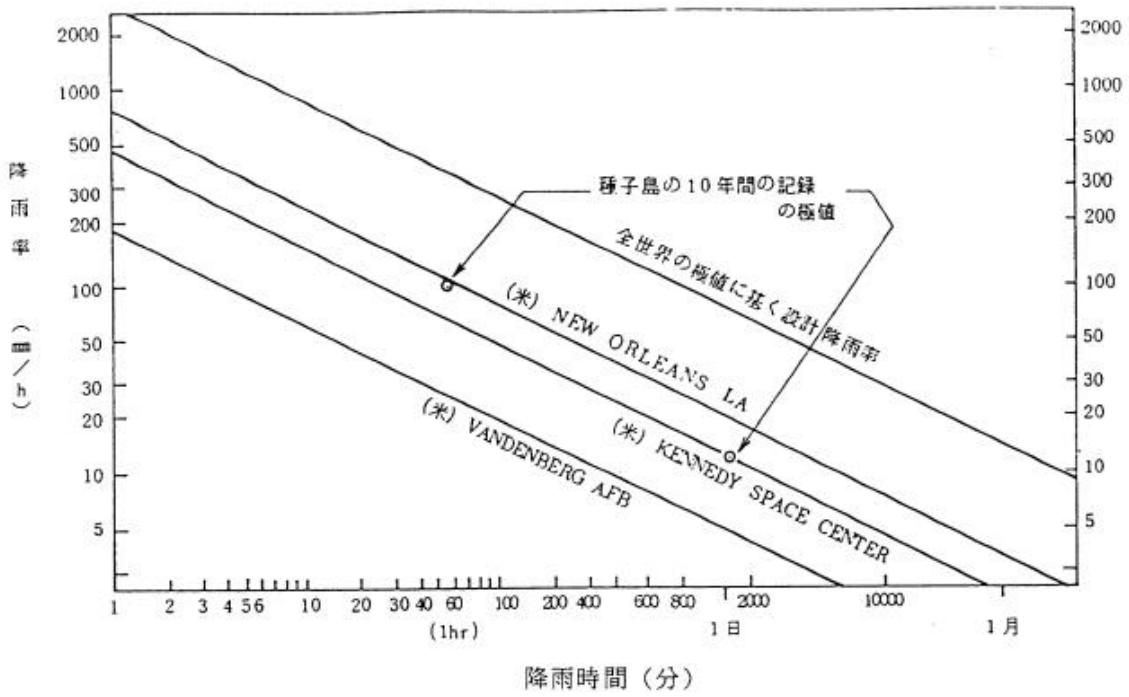


図 3.2－ 1　設計降雨率

(3) 雨滴の大きさ

雨滴の大きさは、降雨率によって変わる。 降雨率が大きい程、雨滴も大きくなる。雨滴の大きさは0.5mm から4.0mm まで記録されているが、6mm 以上の雨滴の雨は通常起るとは考えられていない。

3.2.1.2 高度による降雨率の分布

降雨率は、通常高度が大となるにつれて減少する。参考文献 [7)] によれば、各高度における地表での降雨率の百分率は表3.2－ 3 の如くなっている。

表 3.2－ 3　高度による降雨率の分布

地表よりの高さ (km)	百分率 (%)	地表よりの高さ (km)	百分率 (%)
0	100	6	7
1	90	7	2
2	75	8	1
3	57	9	0.1
4	34	10 以上	＜ 0.1
5	15		

3.2.2 ひょう

ひょうは直径5mm 以上の氷粒であると定義される。大きなひょうは2cm 以上の直径を有する。ひょうの比重は0.60～ 0.92 である。

3.2.2.1 地上におけるひょう

ひょうの落下は、比較的小規模の面積内で起こる、継続的現象である。

(1) 頻　度

ひょうの降下頻度は年間ひょう日で表される。KSC での年間ひょう日は1 日以下、VAFB (バンデンバーグ空軍基地) で2～ 7 日等となっている。

(2) ひょうの大きさ

図3.2－ 2 は、米国におけるひょうの大きさと降下の確率を示す表であるが、横軸には指示されたひょうサイズより大きなひょうが降る危険率を併わせ示している。

(3) ひょうの降下速度

ひょうの最終降下速度は、参考文献[7)]によれば、次の式で与えられる。

$$W = 115\sqrt{D} \qquad (2)$$

ここで、W： 最終速度 (m／ sec)

D： ひょうの直径 (cm)

(4) ひょうの落下の数

米国の測定例では、930cm^2（ 1ft^2） 当り平均 24 個であり、300 個を超える確率は 5% である。（ 図3.2－ 3 参照）

3.2.2.2 高度によるひょうの分布

ひょうが降る確率は、地表から高度5km までは増大するが、それより上空では急激に減少する。フロリダの雷雨のデータでは、高度5km で雷雨中を飛行する航空機が、ひょうに出くわす確率は、10% である。[7)]

3.2.2.3 推　奨　値

日本におけるデータが十分でないこともあり、3.2.2.1～ 3.2.2.2 で述べた値を参考とするにとどめるものとする

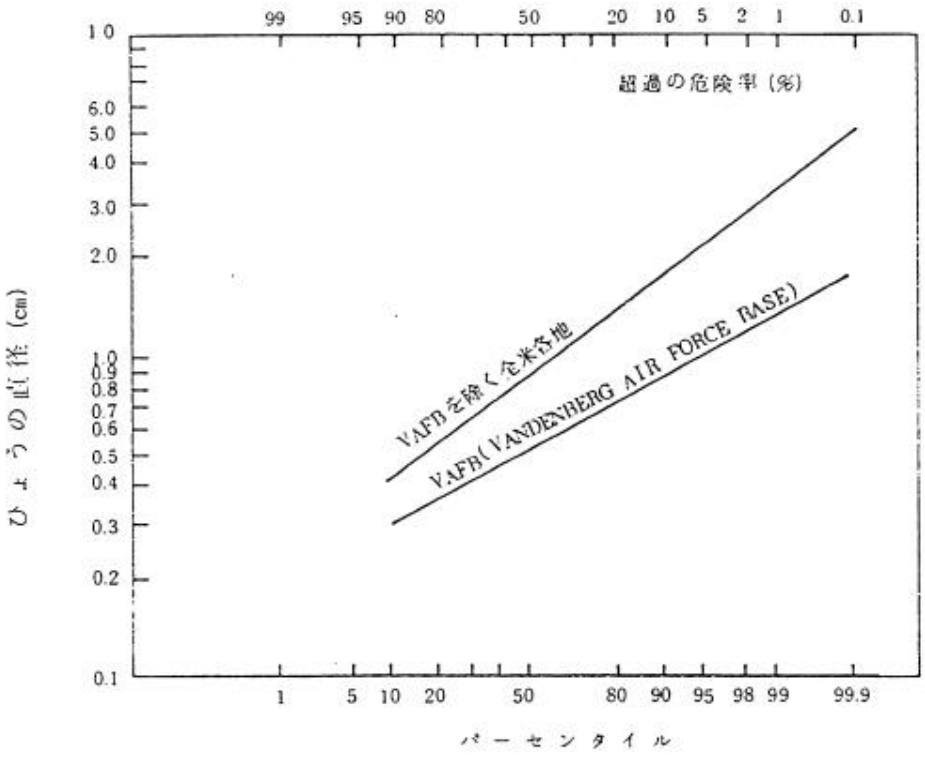


図 3.2-2　各地域における最大ひょうの大きさ

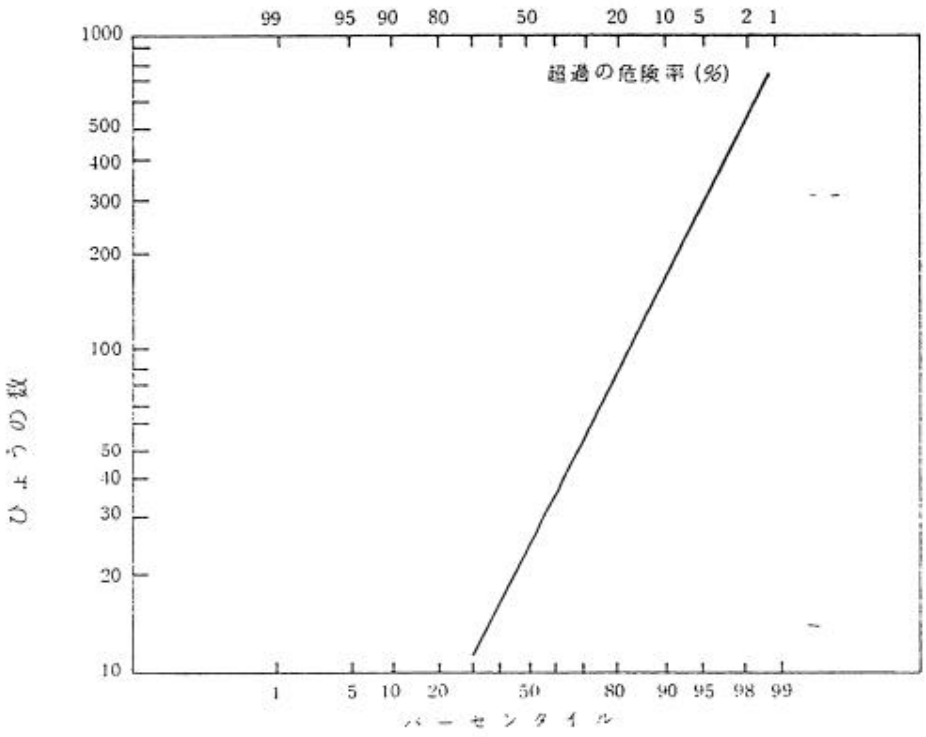


図 3.2-3　930cm2（ 1ft ^{2}）　当りの降ひょう時のひょうの数の確率

参考文献

(1) 正野重方“ 気象学総論” 地人書館 昭和43 年、9 版.
(2) 斉藤錬一他“ 強雨の統計的研究” 研究時報7.257－ 276 1955.
(3) 鈴木栄一他“ 降水量に関する統計的研究” 研究時報5.655～ 668 1953.
(4) 高橋浩一郎“ 気象統計” 地人書館 昭和36 年、6 版.
(5) 気象庁 気象年鑑 1985 年版.
(6) 気象観測10 年報 昭和50 年1 月～ 昭和59 年12 月 種子島宇宙センター技術第2課 (昭和60 年2 月) .
(7) NASA TM-82743 Terrestrial Environment (Climatic) Criteria for Use in Aerospace Vehicle, 1982 Revision.

3.3. 海塩粒子及び砂塵

3.3.1 海塩粒子

3.3.1.1 現在の状況

海塩粒子は、海水中に含まれる気泡が水面近くで破裂する際に生成される塩分（ 主としてNaCl およびMgCl$_2$） を含んだ小粒の水滴であって、破裂粒子の大きいものはその近傍に落下するが、微小粒子となったものは乱流によって空気中に舞い上がり、この粒子が風によって陸地へと運ばれてくるものである。一般に潮気とよばれているものである。

海塩粒子は、気象環境および測定条件によりそれぞれ測定結果が異なるので一概に比較することは困難であるが、北勲績武氏は風速と塩分の到達距離について図3.3-1[1)]のような結果を報告し、またその付着量を図3.3－ 2[2)]のように報告している。

これらの結果は風速、風向、波浪の大きさによって潮風の影響の受け方が異なることを意味している。

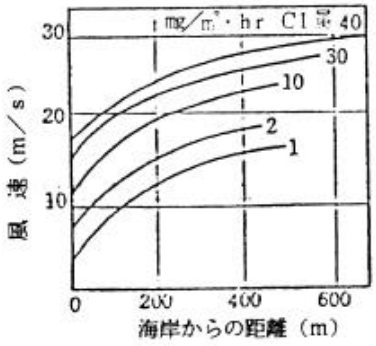


図 3.3-1 風速と海塩粒子の到達距離

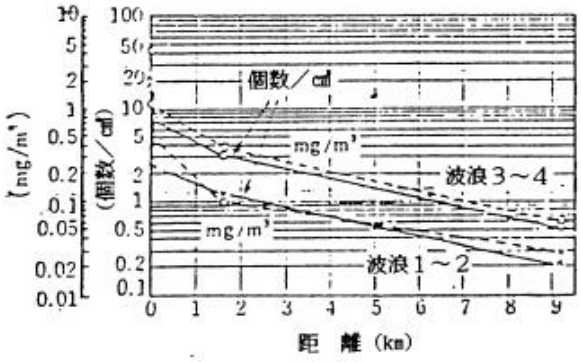


図 3.3-2 波浪の高さと海塩粒子の到達距離

海塩粒子が金属表面に付着すると吸湿性のため金属表面をぬらしやすくし、しかも水滴そのものの電気伝導が大きいために電気化学的腐食反応を促進することになり腐食度は大きくなる。図3.3-3 と図3.3-4 を比較すれば、いかに腐食度が促進されているかが想像できよう。

Larradec[3)]は、Kure-Beach の海岸から24m (80ft) の地点での腐食度は、240m (800ft) 離れた地点に比較して著しい腐食度を示していると図3.3-5 のような結果を報告し、海塩粒子の腐食に及ぼす影響の大きいことを強調している。

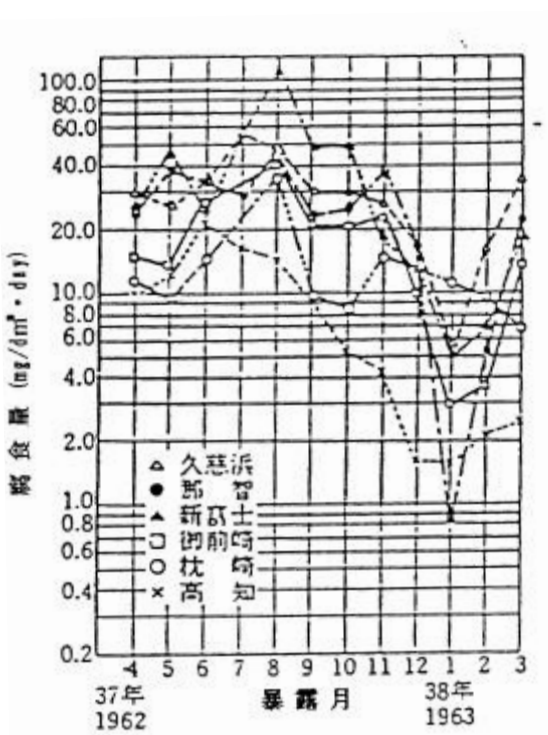


図3.3-3　太平洋沿岸地域における
各月の軟鋼の腐食傾向

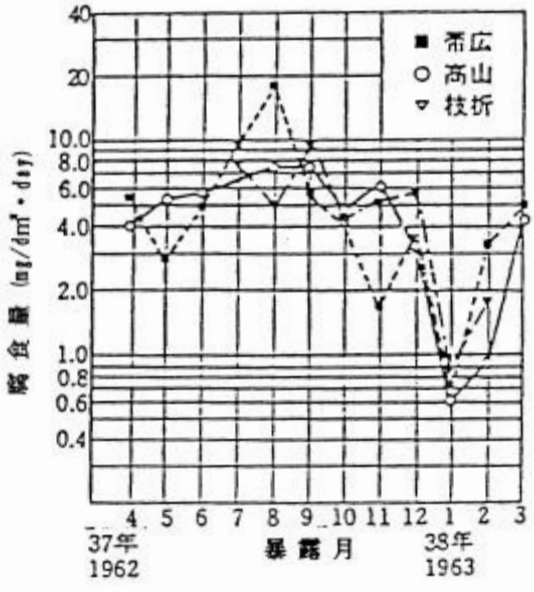
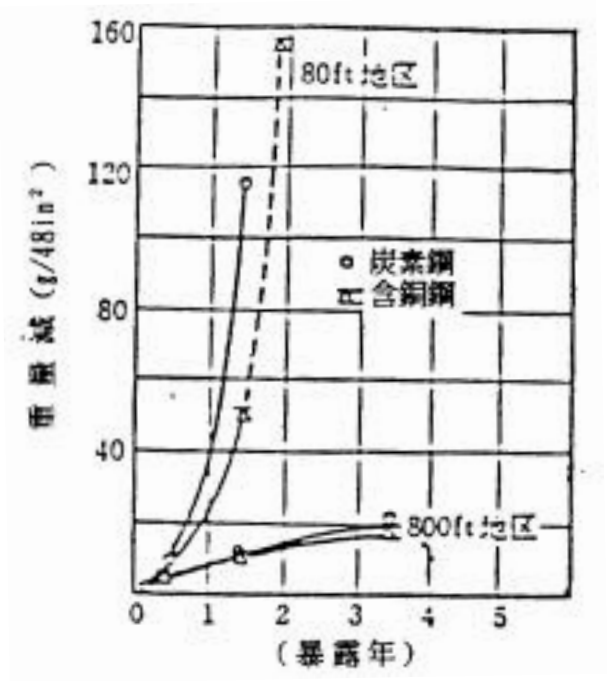


図3.3-4　内陸地域における
各月の軟鋼の腐食傾向



曝露年

図 3.3-5　海岸からの距離による腐食量の相違性

以上のように海塩粒子は金属腐食作用を生じる重要な要素であることを考えて材料の選択には考慮すべき要因である。各種金属に対する大気暴露試験のデータ例を表3.3-1 に示す。[4)]

表 3.3-1　種々の金属の定常腐食速度（ 10 年目）

（ 単位： 25μ (mil) ／ y)

	工業地帯 (New York 市)	臨海地帯 (La JoIIa)	田園地帯 State College)
アルミニウム	0.032	0.028	0.001
銅	0.047	0.032	0.023
鉛	0.017	0.016	0.019
錫	0.047	0.091	0.018
ニッケル	0.128	0.004	0.006
亜鉛(99.9%)	0.202	0.063	0.034
亜鉛(99.0%)	0.193	0.069	0.042
炭素綱	0.38 ＊	-	-
耐候性(0.4Cu,0.16P,1.1Cr)	0.04 ＊	-	-

＊ Kearey, N.J.での値

我国のように四面を海に囲まれた地理的条件の下では塩分を含んだ海洋性大気の影響によりさび、腐食等の害を受けることが多い。

大気中の海塩粒子は図3.3-6 のように海岸線からの距離が近いほど、また波浪が高いほど濃度が高い。組成についての資料は現在見当らない。海岸近くでは海水に含まれる塩分と著しく異なることはないと思われるが内陸部に運ばれる場合には空気中のガスなどにより化学的変化をおこすことが考えられる。

海塩粒子は処理の充分でない金属面に付着してさび、腐食をおこし、機械的構成品及びアッセンブリの可動部分の固着、塗装、めっき面のふくれ等が発生する。また絶縁物表面に付着して絶縁低下をおこす。

これらの効果は海塩粒子が連続的に作用するより間欠的に作用する方が著しいこともある。ロケットが海塩粒子の影響を受けるのは主として輸送中、貯蔵、保管中及び射場作業中である。

発射以降の段階ではこの影響を除外できるので、地上における段階での梱包、貯蔵環境及び作業環境を制御することによりロケットにかかる海塩粒子の影響を可能な限り軽減させることが望ましい。ただ射場作業においてロケットは打上げ時には大気に曝されるわけであり整備塔内に格納されている時も外気の影響を完全に遮断することは困難なのでロケットとしてそれに耐える最小限の配慮は必要である。

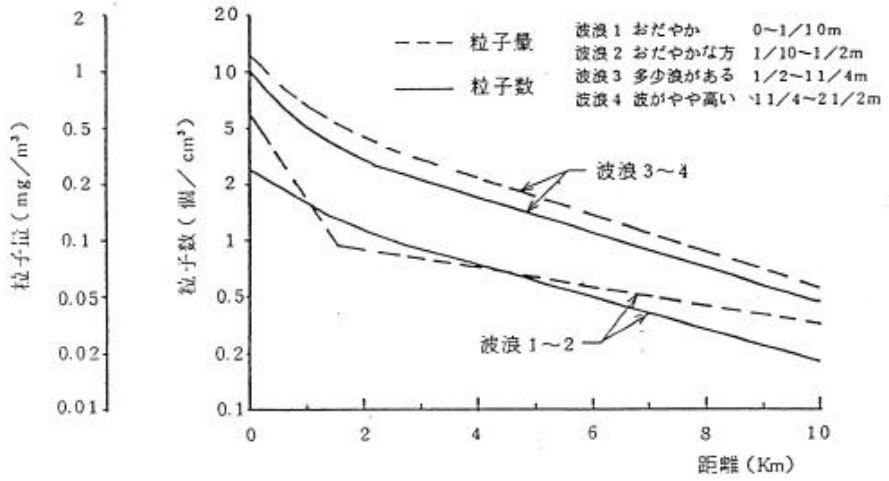


図 3.3-6　　海岸距離と海塩粒子

3.3.1.2 海塩粒子に対する配慮

ロケット自体として海塩粒子の配慮を必要とするのは主として射場作業中であり、この場合にもその環境に曝されるのはロケットの外表面等一部の範囲に限られるので、必要な部分についてのみ耐塩性を要求し、それ以外の部分については防護用包装、空調、窒素ガスパージ等の保護手段を実施するのが適当である。一般には、製品について直接試験による確認が必要な場合は少なく、設計段階における部品及び材料ならびに保護プロセスの合理的な選定と製造過程におけるそれらの正規の確認によって製品が要求に適合しているか否かの確認を行うものとする。

特に試験による確認を必要とするサブ・アッセンブリについてはMIL-STD-810D、METHOD509.2 [5)]による試験が一般的である。

3.3.1.3 試　験

塩水噴霧試験は塩水雰囲気に対するロケットの抵抗力を確認するために実施する。

MIL-STD-810D、METHOD509.2 による要求；温度 35℃、濃度 5% の塩水噴霧を 48 時間。

3.3.2 砂　塵

3.3.2.1 現在の状況

種子島射場は海に面して砂あるいは砂岩の上に建設されており、これらを含む砂塵の存在が予想されるが、砂塵に関する測定資料がないため正確な実態を把握することはできない。ただ種子島における海岸の砂の分析データがあるので、砂塵の実態を推測する手段として参考までに表3.3-2 に示す。

表 3.3-2　発光分光分析による砂分析データ（S46 年、I・H・I 調査）

試　　科		Si	Ca	Al	Mg	Na	Fe	Ti	Mn	K	V	Cr	Cu	Ni	そ　の　他
種子島地域	試科 A	2S	2S	S	S	F	M	M	M	W	T	T	－	－	－
	B	2S	S	S	S	F	M	M	W	W	－	－	－	－	－
	C	2S	S	S	S	F	M	M	W	W	－	－	－	－	－
	D	2S	F	S	S	S	F	F	M	M	W	W	T	T	－
	E	2S	F	S	S	S	F	F	M	M	W	W	T	T	－
	F	2S	S	S	S	S	M	M	W	M	T	－	－	－	－
（田無・瑞穂）東京地区	イ	2S	3S	S	S	M	F	M	M	W	W	W	W	T	Pb, Co, Ag, Zn, Sn, Mo
	ロ	2S	2S	S	S	M	F	M	M	W	W	T	M	T	Pb, Co, Ag, Zn, Sn
	ハ	2S	2S	S	S	F	F	M	M	W	W	W	T	M	Pb, Co, Ag, Sn
	ニ	S	S	S	F	W	S	M	M	T	W	F	M	F	Co, Ag, W, Mo, Pb, Zn, Sn
	ホ	2S	S	S	S	S	F	M	M	M	W	M	M	M	Ag, Co, W, Mo, Pb, Sn

付記1 分析試料；種子島6 種類，東京地区（田無，瑞穂）5 種類

2 強　　度；記号5S～S＞F＞M＞W＞T の順

－は無し

3.3.2.2 砂塵に対する配慮

砂塵試験の目的は、砂塵により生じる宇宙機の損耗や腐食がその機能、性能に如何に影響するかを調べるためのものである。

砂塵によるトラブルとしては、砂の組成が微細なため（ 例えば関東ローム質） ベアリングの機能低下を招いたり、通風の悪化により電子機器の異常加熱を誘発したり、あるいは砂塵に硫化鉄が含まれていたため（ 例えば鹿屋基地付近の砂塵） それが湿風で運ばれて化学的な複合作用の結果さび等の腐食を促進する等が考えられる。従って各対象機器の製作地あるいは納地における砂塵の実態（ 砂塵の濃度、組成、大きさ、砂塵を伴った空気の速度及び温湿度等）を正確に把握するとともに予想される運用条件を考慮して、これら試験の適用を個別に規定する必要がある。しかしロケット自体としては、砂塵を直接受けるのは射場作業中であり、この場合も機体の外表面等一部の範囲に限られるので、必要な部分についてのみ耐砂塵性を考慮し、それ以外の部分については防護用包装、空調等の保護手段を規定するのが適当である。

一般的には、保護装置の密閉性が要求に適合しているか否かの確認を行う。

特に試験による確認を必要とするサブ・アッセンブリについては、NASA TMX-64589 [6)] の6 章あるいはMIL-STD-810D、METHOD510.2 による試験が実施される。

3.3.2.3 試　験

砂塵試験は微小粒子（ 塵、細かな砂） による機器のきず、裂け目・ベアリング及びジョイント内にしみこむ可能性に対する機器の抵抗能力を確かめるために実施する場合と、吹きつける砂の条件下で、その大粒で鋭い角を持つ粒子による摩滅（ 腐食） 又は目詰りの影響のため機器の性能、信頼性及び整備性の劣化なしに保管され、作動することができるかどうかを、決定するために実施する場合がある。

(1) NASA　TMX-64589 の6 章による場合

粒子寸法、硬度及び分布は別に必要な場合は仕様書に規定されるが、一般に表3.3-3 に示す条件を適用すること。

(2) MIL-STD-810D、METOD510.2 による場合

他に規定のない限り表 3.3-4 によること。

表 3.3－ 3　NASA TMX-64589 の 6 章による要求

	風砂環境	風塵環境
粒子寸法	0.08～ 0.12mm	1×10^{-4}～ 2×10^{-4}mm
硬度	7～8moh	7～8moh
分布	0.02g／cm ^{3}	6×10^{-9}g／cm ^{3}
風速	10m／ sec	10m／ sec
時間	10 時間	10 時間

表 3.3－ 4　MIL-STD-810D、METOD510.2 による要求

	風砂環境	風塵環境
粒子寸法	1±0.5% が 20 メッシュで残る 1.7±0.5% が 30 メッシュで残る 14.8±1.0% が 40 メッシュで残る 37.0±1.0% が 50 メッシュで残る 28.6±1.0% が 70 メッシュで残る 12.7±1.0% が 100 メッシュで残る 5.2±1.0% が 100 メッシュを通過	100% が 100 メッシュを通過 98±2% が 140 メッシュを通過 90±2% が 200 メッシュを通過 75±2% が 325 メッシュを通過
硬度	7moh	注 1　赤色陶土又は珪土粉末
分布	注 2　a.　2.2±0.5g／m^3 b.　1.1±0.25g/m^3 c.　0.177g/m^3	10.6±7g／m^3
風速	8.9m／ sec	18m／ sec
時間	1 面 90 分以上	6 時間

注1　赤色陶土の成分

$CaCO_3$、$MgCO_3$、CaO Na_2O、TiO_2、	5%
Fe_2O_3、（ 酸化第二鉄）	10±5%
Al_2O_3、（ 酸化アルミニウム）	20±10%
SiO_2、（ 二酸化珪素）	残り

注2　a.　未舗装の地上で作動する航空機の付近で作動する機器

b.　作動中の車両付近で作動する機器

c.　自然条件に対してのみ作動する機器

参考文献

(1) 北勲績武“ 強風による海水塩分の散布” 研究時報11.5 (1959) .

(2) 神山恵三“ 塗装技術ハンドブック” 朝倉書店　昭45.

(3) C. P. Larradec : Corr., 15. 10 (1959) .

(4) 日本学術振興会編“ 金属防蝕技術便覧” 昭47 新版　日刊工業.

(5) MIL-STD-810 D Environmental Test Methods and Engineering Guidelines. Method 510.2.

(6) NASA TMX-64589　6 章.

3.4. 湿度、菌及び大気汚染

3.4.1 湿　度

3.4.1.1 概　要

湿度に関して、宇宙機で問題となるのは主に高湿度側である。高湿度はそれ自身、金属の腐食、絶縁物の導電性の増加を引き起こすだけでなく、菌の発育、腐食性ガスによる金属の腐食を促進し、機器に悪影響を及ぼす。

3.4.1.2 技術の現状

(1) 湿度の状況

空気中に含まれた水蒸気の分圧を水蒸気圧又は水蒸気張力といい気圧と同じくｈPa単位で表わす。容器に水を入れて放置しておくと容器中の空間部は水蒸気で満される。

このとき水温と空気の温度は等しく空間中の水蒸気圧はこの温度のみで決まる。これを飽和水蒸気圧という。相対湿度R は飽和水蒸気圧E に対する現在の水蒸気圧e の比をパーセントで表わす。即ち、

$$R = \frac{e}{E} \times 100\%$$

また、E－ e を飽差、現在の水蒸気圧を飽和水蒸気圧とするような温度を露点又は露点温度τ という。

1m^3 中に含まれた水蒸気の質量（ g） を絶対湿度A という。

$$A = 217\frac{e}{T} \quad (g/m^3) \qquad T：絶対温度$$

1kg の湿った空気中に含まれた水蒸気の質量を比湿S といい

$$S = \frac{622e}{P - 0.398e} \quad (g/Kg) \qquad P：気圧$$

1kg の乾燥空気と共存する水蒸気の質量x を混合比といい

$$x = \frac{622e}{P - e} \quad (g/Kg)$$

湿度は10% 以下になることも100% となることも多い、世界各地の年平均湿度は砂漠地方を除いて65% ～ 85% 、わが国各地の年平均湿度は75% ～ 80% 、水蒸気圧は高さとともに減少し、

$$e_h = e_o 10^{-\frac{h}{6}\left(1+\frac{h}{20}\right)} \qquad \text{SURING(1990)}$$

$$e_h = e_o 10^{-\frac{h}{8}\left(1+\frac{h}{60}\right)} \qquad \text{HERGESELL(1991)}$$

eh： 高さh での水蒸気圧 eo は地上の水蒸気圧

大気中での錆の発生には温度と湿度が重要な因子である。即ち金属が金属表面の温度よりも高い空気に触れると、空気中に含まれている水蒸気が水として金属表面に折出し、金属面をぬらす。この現象が結露であり、“ しめり大気腐食” の原因となる。

大気中ではさび速度が急に増加し始める湿度の領域があり、この湿度を“ さびの発生の限界湿度” とよんで、鉄鋼、銅合金類では相対湿度70% が限界湿度とされている。

一般に結露しやすい条件を列挙すると次のとおりである。

（ｉ ）微小なすきまや微細な穴の部分は毛細管凝縮により湿度が100% にならなくても結露を生ずる。酸化鉄（ 一般の赤さび） は一般に多孔性であるため毛細管凝縮を生じやすい。さびのある鉄がいっそうさびやすいのはこのためである。

（ⅱ ）水の飽和蒸気圧は塩類を含んでいると低下するので、幾分でも塩分を含んでいる空気のほうが、清浄な空気より凝縮しやすい。このことは湿度が100% にならなくても水分が凝結する可能性のあることを意味している。

（ⅲ ）気象的には、湿度が高く大気が安定していて風がなく、気温の下がり方が急な日ほど結露しやすい。

（ⅳ ）鉄などの熱伝導のよいものは、気温が低くなるに従って鉄自体すぐ表面の温度が下がるので、鉄表面からの熱放射による冷却により結露するようになる。

表3.4－ 1 にわが国の代表的な気象環境地域での年間の腐食量と各月ごとの腐食量（ 軟鋼） の測定例を示す。[1)]

湿度は、地域、時期によって大きく異なり、また、1 日の間でも変化する。日本での平均湿度は冬で60～ 80% 、夏で80～ 90% 程度である。また、霧が発生したような時には、湿度は100% に達している。

(2) 湿度の及ぼす影響[1)]

高湿度に起因する金属のさび発生の大きな原因は、金属がその表面の温度より高い空気に触れることによる結露であり、この現象は湿度が90% を越すと顕著となり、金属のさび発生速度が急速に増大する。湿度が70% 以上であっても、温度の変化が無ければ結露を生じないので、さびは殆ど発生しない。したがって、高湿度と温度の変化が組み合わさった時に金属のさび発生が著しくなることになる。

表 3.4－ 1　各地区の 1 か年の気象要素と軟鋼の腐食（ 試験期間と測定者を備考欄に示した）

地区	腐食量 (mg/cm²)	腐食量 (mdd)	腐食量 (mm/yr)	平均気温 (℃)	最高気温 (℃)	最低気温 (℃)	最高最低気温の差 (℃)	露点温度 (℃)	平均蒸気圧	平均湿度 (%)	平均風速 (m/s)	平均日照時間 (hr)	積算日照時間 (hr)	日照率 (%)	平均降水量 (mm)	積算降水量 (mm)	平均海塩粒子 (mg/dm²)	積算海塩粒子 (mg/dm²)	平均亜硫酸ガス (SO₂mg/day·dm²)	積算亜硫酸ガス (SO₂mg/day·dm²)	備考
御前崎	33.3	9.1	0.042	16.7	19.7	13.1	6.6	12.3	16.7	74	5.9	206.3	2475.6	57	132.7	1592.4	0.4	4.8	0.24	87.6	腐防研第4報
枕崎	26.4	7.3	0.033	17.9	21.7	14.5	7.2	14.0	18.0	76	4.9	187.9	2254.8	43	156.7	1880.4	0.4	4.8	0.27	98.6	36.5～37.4
高山	16.5	4.5	0.021	10.9	17.4	6.6	10.8	7.8	12.5	79	1.3	154.9	1858.8	41	179.8	2157.6	0.1	1.2	0.30	109.5	
輪島	23.4	6.4	0.029	14.1	17.9	10.5	7.4	10.2	14.3	78	3.3	150.3	1803.6	39	229.7	2755.4	0.5	6.0	0.27	98.6	
帯広	14.6	4.0	0.018	7.1	13.1	2.2	10.9	3.0	9.4	72	2.2	175.4	2104.8	49	69.1	829.2	0.2	2.4	0.73	266.5	
川崎(日本鋼管)	114.8	31.5	0.144	16.3	20.5	12.0	8.5	10.5	14.9	70	4.5	188.5	2262.0	52	78.2	938.4	0.9	10.8	3.65	1333.0	
東京(石川島)	83.7	23.0	0.105	16.1	20.9	11.2	9.7	9.6	14.3	66	3.2	181.0	2172.0	50	94.3	1131.6	0.3	3.6	3.14	1148.0	
川崎	95.0	26.2	0.121	16.3	20.5	12.0	8.5	10.5	14.9	70	4.5	188.5	2262.0	52	78.2	938.4	0.57	6.8	1.46	534.8	新日鉄
尼崎	84.0	23.2	0.106	16.6	21.2	12.7	8.5	10.4	14.8	82	3.2	185.7	2228.7	60	94.0	1128.9	0.79	9.5	1.22	446.4	(旧富士鉄技報)
室蘭	66.0	18.3	0.084	9.2	12.0	6.7	5.3	7.7	10.5	83	4.9	163.3	1964.3	44	108.7	1305.7	2.39	28.7	1.77	647.2	Vol. 12, No. 2
足摺	88.0	24.1	0.112	18.3	21.1	15.8	5.3	12.3	17.1	69	3.9	200.8	2411.7	55	214.2	2571.3	2.09	25.1	0.04	13.3	昭36.5～37.4
釜石	39.0	10.7	0.050	11.6	16.5	7.8	8.7	6.2	11.7	71	2.3	174.2	2093.3	48	104.2	1251.8	0.49	5.9	0.33	121.0	
相模原	42.0	11.5	0.053	15.5	19.3	9.8	9.5	10.5	14.9	70	4.5	188.5	2262.0	52	108.9	1305.0	0.25	3.0	0.22	82.0	
広畑	52.0	14.3	0.066	15.4	20.5	11.0	9.5	12.0	14.0	76	2.5	156.2	1877.9	43	182.8	1591.7	1.00	12.1	0.85	309.1	
山形	24.0	6.6	0.031	11.9	17.3	7.1	10.2	10.4	12.6	78	1.8	143.9	1726.4	39	104.0	1249.5	0.10	1.3	0.09	34.5	
旭川	21.0	5.8	0.027	7.2	12.6	2.6	10.0	3.1	9.9	78	2.1	141.1	1693.5	37	92.8	1113.5	0.18	2.1	0.28	101.3	
彦根	26.0	7.1	0.033	14.8	19.6	11.2	8.4	12.0	14.0	72	2.9	167.2	2007.7	45	201.0	2416.9	0.10	1.2	0.07	24.9	
宮崎	26.8	7.3	0.034	17.0	22.2	12.3	9.9	12.7	16.6	78	3.4	197.0	2360.1	54	196.0	2356.3	0.27	3.2	0.09	32.8	住友金属
松江	26.3	7.2	0.034	14.2	19.0	10.2	8.8	12.8	14.8	76	2.9	179.0	2150.0	48	190.9	2386.0	0.27	3.2	0.10	36.5	Vol. 20, No. 2
長野	18.5	5.1	0.024	11.2	17.0	6.7	10.3	8.5	11.1	74	2.7	176.0	2111.7	48	87.2	1046.1	0.16	1.9	0.11	40.2	昭40.7～41.6
松山	35.4	9.7	0.045	15.5	20.4	11.3	9.1	10.3	14.3	73	2.3	191.1	2298.0	52	143.0	1717.7	0.24	2.9	0.31	113.2	
小樽	29.3	8.0	0.037	8.1	12.0	4.7	7.3	6.6	9.9	70	2.9	137.0	1643.3	35	127.4	1529.6	0.50	6.0	0.38	138.8	
仙台	30.3	8.3	0.039	12.0	16.5	7.7	8.8	6.7	11.7	72	2.7	136.1	1633.0	42	103.9	1247.2	0.31	3.7	0.46	168.0	
新潟	40.1	11.0	0.051	12.9	17.1	9.4	7.7	8.1	12.5	74	4.3	161.2	1933.6	42	144.5	1732.8	1.72	20.6	0.98	357.6	
和歌山	44.3	12.1	0.057	15.7	20.8	11.7	9.1	12.5	14.5	70	3.6	177.5	2134.0	48	140.5	1684.6	1.01	12.1	1.25	456.5	
名古屋	66.6	18.2	0.085	14.7	19.4	10.1	9.3	9.3	13.6	72	3.3	188.5	2262.1	51	139.6	1675.6	0.59	7.1	1.48	540.2	
尼崎	56.9	15.6	0.073	15.9	20.4	11.7	8.7	9.5	13.7	67	2.9	172.5	2076.4	47	133.0	1595.2	0.56	6.7	1.86	679.8	
北九州	48.8	13.4	0.062	14.5	21.0	9.2	11.8	12.7	14.7	79	1.7	161.1	1937 2	44	151.1	1813.5	0.80	9.6	2.13	778.0	
東京	55.3	15.1	0.071	15.2	19.3	11.3	8.0	7.7	12.7	63	3.7	163.8	1964.6	45	156.0	1872.1	0.38	4.6	2.21	807.0	
東京	112.1	30.7	0.144	16.1	20.9	11.2	9.7	9.6	14.3	66	3.2	181.0	2172.0	50	94.3	1131.6	0.4	4.8	2.37	866.0	防蝕技術
御前崎	42.2	11.5	0.054	16.7	19.7	13.1	6.6	12.3	16.7	74	5.9	206.3	2475.6	57	132.7	1592.4	0.4	4.8	0.24	87.6	Vol. 13, No. 1
高知	22.1	6.1	0.028	16.7	22.4	12.2	10.2	14.3	16.3	74	2.2	200.4	2407.7	55	245.5	2951.6	0.4	4.8	0.07	25.6	昭35.5～37.4
枕崎	31.8	8.7	0.041	17.9	21.7	14.5	7.2	14.0	18.0	76	4.9	187.9	2254.8	43	156.7	1880.4	0.3	3.6	0.17	62.2	
直江津	36.5	11.5	0.046	14.0	18.8	10.2	8.6	9.7	12.0	77	2.4	150.9	1812.0	40	274.2	3295.7	3.4	40.8	0.18	65.7	
輪島	25.1	6.9	0.032	14.1	17.9	10.5	7.4	10.2	14.3	78	3.3	150.3	1803.6	39	229.7	2756.4	0.5	6.0	0.17	62.2	
帯広	19.2	5.3	0.024	7.1	13.1	2.2	10.9	3.0	9.4	72	2.2	175.4	2104.8	49	69.1	829.2	0.2	2.4	0.27	98.7	
塩原	25.2	6.9	0.032	13.6	19.4	8.9	10.5	11.8	13.8	74	2.3	183.8	2201.9	52	105.7	1266.6	0.2	2.4	0.12	43.8	
高山	17.9	4.9	0.023	10.9	17.4	6.6	10.8	7.8	12.5	79	1.3	154.9	1858.8	41	179.8	2157.6	0.1	1.2	0.12	43.8	
上沼	56.0	15.3	0.071	13.1	18.9	8.1	10.8	11.4	13.5	76	1.9	150.0	1801.9	41	115.2	1386.4	0.5	5.5	0.49	179.0	川鉄技報
ノ岬	42.0	11.5	0.053	16.5	19.9	13.5	6.4	13.5	15.5	69	4.6	194.0	2326.1	53	239.0	2866.1	2.0	24.1	0.11	40.2	Vol. 2, No. 2
																					昭42.7～43.6
鶴見	119.6	32.8	0.152	15.2	19.6	11.3	8·3	12.3	14.3	71	4.2	165.0	1979.5	46	94.9	1139.0	2.6	31.1	2.25	823.0	亜鉛メッキ協会
伊良湖	42.8	11.7	0.054	15.7	19.6	12.5	7.1	13.2	15.2	73	4.9	178.5	2140.3	49	93.3	1119.3	2.3	27.7	0.47	171.7	
奈良	30.7	8.3	0.039	14.7	20.3	10.0	10.3	12.1	14.1	75	2.4	181.0	2170.2	49	75.3	900.1	0.8	10.0	0.48	175.2	昭39.3～40.2
平均	45.3	12.5	0.058	14.1	18.8	9.9	8.8	10.1	13.8	73	3.2	173.3	2080.8	47	140.6	1676.5	0.7	8.8	0.8	287.2	
σ	28.0	7.7	0.035	3.0	2.7	3.2	1.6	2.9	2.2	4	1.2	19.0	227.6	6	53.7	643.2	0.8	9.4	0.9	333.0	

3.4.1.3 推　奨　値

(1) 基準とその説明

(a) 基　準

相対湿度100% 以下

(b) 基準の説明

日本においては、自然の環境では相対湿度が100% に達することはまれでないため、100% 以下を基準とする。

3.4.2 菌

3.4.2.1 概　要

菌は、一般に考えられているような動植物や食品のみでなく、ほとんどあらゆる材質の表面に発育して、材質の機能、性能を損なう。

ロケット及びその搭載機器は、菌の影響による機能の劣化が生じないよう、適切な材料選択及び保護手段を取る必要がある。

3.4.2.2 技術の現状

(1) 菌の特性とその影響[1)2)3)]

菌は、温度5～ 35℃ 、相対湿度30% 以上で成長し、50℃ 以上で発育がとまる。

菌糸は100℃で死ぬが、胞子は150～ 180℃でないと死滅しない。成長するための最良の条件は、30℃ 、90% 程度である。一般に、日本は欧米と比較して湿度が高く、菌の発育に適した環境にある。

金属の腐食現象は物理化学的又は電気化学的な機構によるものであるが、この反応に対して直接または間接に関与し、これを促進する生物が存在し、しかもその影響が意外に大きいことが近年次第に明らかになってきた。生物が腐食に関与する仕方には陰極または陽極反応に対して生物化学的に作用し、電気化学的反応速度を早めるもの、新陳代謝生成物によって保護皮膜や金属表面皮膜を変質または劣化させて、腐食を促進するもの、生物集落が局部的に金属表面をおおう結果、イオンの濃淡電池を形成して腐食の原因となるもの、等がある。腐食に関連する生物としては、

(a) 鉄バクテリア（ 水中に溶存する第一鉄を酸化して水酸化第二鉄として体の表面に蓄積する機能をもった一群のバクテリア）

・Gallionella　・Sphaerotilus　・Leptothrix

・Siderocapsa　・Crenothrix

(b) 水素バクテリア（ 分子状の水素をヒドロゲナーゼと称する酵素によって活性化し、

これを水素受容体に伝達するとき生ずるエネルギーを利用して炭酸同化を行なう細菌群）

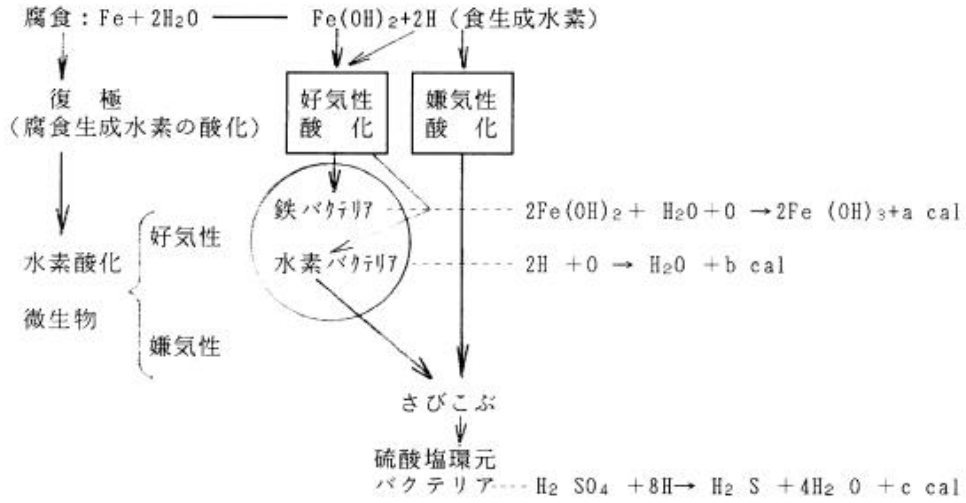
・ヒドロゲモナス（ Hydvogemonas ）

(c) 硫黄バクテリア（ 水中の硫化水素やチオ硫酸塩あるいは硫黄を酸化する能力をもった一群のバクテリア）

・Beggiatoa　・Thiobaillus　・Thiospira

(d) 硫酸塩環元バクテリア（ 硫酸塩を環元する際に生じるエネルギーを利用して生活するバクテリアで、環元に当ってはヒドロゲナーゼによって水素を活性化すると同時に、受容体の硫酸に対しても環元酵素が働くものと考えられており、この働きによって水素が酸化されて復極がおこるので腐食反応は好気性条件下（ 酵素の存在する） と同じように進行する。）

・サプロビブリオデサルフルカンス（ Saprovibrio desulfuricans）



鉄の腐食に対するバクテリアの役割

(e) 藻類（ 体内に葉緑素などの色素をもち日光のエネルギーを用いて炭酸同化作用を営む下等の植物で、炭酸同化作用によって酸素が生産放出され、死んで分解するときに炭酸、しゆう酸、けい酸などを生じて腐食を進行させる）

・Oscillatoria

(f) 真菌類（ 水中で生育するかびの仲間できれいな水にも、下水のような水にもみられる。ことに循環式の冷却系統中に繁殖し、強い酸性の排水中にも生育するものもある。真菌類はスライムを構成する生成物でスライムによる部分腐食の原因となる。スライムはパイプや壁面などに発生する粘質の膜のことで、主として微生物によって作られるが、実際には粘土や、鉄、マンガンなどの酸化物がこれに加わり腐食を促進させる）

・Fusarium　・Penicillium　・Trichoderma

・Aspergillus　・Geofri-chum　・Alterneria

(2) 菌の防護手段

菌の防護手段としては、菌の影響を受けにくい材料を使用すること、表面に防護処理を施すこと、菌が発育しにくい環境におくことが考えられる。

MIL-STD-454H [4] Requirement 4 では、材料が2 つのグループに分けられており、グループⅠ は全ての状態で耐菌性を持つとされており、グループⅡ については、試験により耐菌性の確認を行なう必要があるとされている。(表3.4－ 2)

また、その試験法については、ASTM G-21-70 [5] によるものとされている。

表面の防護処理としては、塗料、コーティグ剤等に殺菌剤を添加するのが一般的である。

殺菌剤は、材質の機能、性能に悪影響を与えず、殺菌力が強く長く持続し、人体への毒性が低い等の条件を満たす必要がある。現在用いられている代表的なものとして

(1) サイアペンダゾール (TBZ)

(2) プレベントール　A3

(3) ダウイシル　S13

(4) ノプコサイド　N96

等がある。

表 3.4－ 2　材料の耐菌性

GROUP Ⅰ (Fungus-inert in all modified states and grades)	
Acrylics	1／ Polyamide
Acrylonitrile-styrene	Polycarbonate
Acrylonitrile-vinyl chloride	Polyester-glass fiber laminates
copolymer	Polyethylene, high-density
Asbestos	above 0.940)
Ceramics	Polyethylene terephthalate
Chlorinated polyether	Polyimide
Fluorinated ethylenepropylene	Polymonochlorotrifluoroethylene
copolymer (FEP)	Polypropylene
Glass	Polystyrene
Metals	Polysulfone
Mica	Polytetrafluoroethylene
Plastic laminates:	Polyvinylidene chloride
Silicone-glass fiber	Silicone resin
Phenolic-nylon fiber	Siloxane-polyolefin polymer
Diallyl phthalate	Siloxane-polystyrene
Polyacrylonitrile	
GROUP Ⅱ (Not fungus-resistant in all grades; fungus-resistance shall be established by test)	
ABS (acrylonitrile-butadiene-styrene)	Polyethylene, low and medium
Acetal resins	density (0.940 and below)
Callulose acetate	Polymethyl methacrylate
Callulose acetate butyrate	Polyurethane (the ester types
Epoxy-glass fiber laminates	are particularly susceptible)
Epoxy-resin	Polyricinoleates
Lubricants	Polyvinyl chloride
Melamine-formaldehyde	Polyvinyl chloride-acetate
Organic polysulphides	Polyvinyl fluoride
Phenol-formaldehyde	Rubbers, natural and synthetic
Polydichlorostyrene	Urea-formaldehyde

1／ Literature shows that under certain conditions polyamides may by attacked by

selectivemicro-organisms. However, for military applications they are considered group I.

前項で述べたように、菌は高湿度において発育が著しいので、低湿度の環境を保つことが、菌に対する防護手段として有効である。

3.4.2.3 推奨値

(1) 設計時の注意事項

菌の影響による材質の機能、特性の劣化を防ぐため、可能な限り、表3.4－ 2 のグループⅠ の材質を使用するようにしなければならない、また、グループⅡ の材質を使用する際には、適切な防護手段を取らなければならない。

(2) 耐菌性試験

耐菌性を確認するための試験は、MIL-STD-454H ではASTM G21-70 によるものとしているが、ここでは我国における気候風土および菌の入手性を考慮し、JIS Z 2911 [6)] の電気機器に対するカビ抵抗性試験によるものとする。

この規格では、

(a) Aspergillus niger FERM S-1

(b) Penicillium citrinum FERM S-1

(c) Rhizopus stolonifer FERM S-7

(d) Cladosporium cladosporioides FERM S-8

(e) Chaetomium globosum FERM S-11

の5 種の菌の混合胞子懸濁液を試料にまきかけた後、温度28±2℃、湿度95～ 99% で28日間培養した後、材質の特性の変化を調べることとなっている。

(3) 基準とその説明

(a) 基　準

JIS Z 2911 の電気機器に対するカビ抵抗性試験の規格で規定されたカビ類に28日間さらされることに相当する環境とする。

この条件での耐菌性が確認、保証されていない材質、表面処理については、試験により耐菌性を確認しなければならない。

(b) 基準の説明

(2)項に述べたように、我国での実施に適したJIS のカビ抵抗性試験を基準として採用した。

3.4.3 大気汚染

3.4.3.1 概　　要

大気汚染物質のうち、宇宙機およびその搭載機器にとって問題となるのは、腐食性ガスであり、SO_2 、NO、NO_2 等が代表である。これらの腐食性ガスによる腐食を避けるため、適切な材料選択および保護手段を取る必要がある。

3.4.3.2 技術の現状

(1) 大気汚染の現状 [7)]

大気汚染物質とは、大気成分以外の物質を人工的に大気に放散させたとき、その物質の量、濃度及び持続時間によっては地区の人間、動植物、構築物などに被害を生じさせる物質をいうものであって、大気中に存在する状態から次のように分類される。

（ⅰ ）ガス（ 各種ガス類）

（ⅱ ）ダスト（ 固体粒子で摩耗、風化その他の原因で発生するもの）

（ⅲ ）フューム（ 昇華、蒸留、焙焼、または化学反応などによって生じた蒸気が凝結してできた固体微粒子）

（ⅳ ）ミスト（ 液体粒子で蒸気の凝結、化学反応、液体の噴霧などによってできたもの）　以上のように人工的に作られたガス、微細粒子（ エアロゾル） が気象条件と相まって形成されたものが大気汚染物質といえよう。表3.4－ 3 はこのような汚染物質の発生源をわかりやすくまとめたものである。大気腐食については、これらの物質の一つ一つが金属の腐食に直接関与するというよりも、各因子の相互作用による場合が多い。たとえばダストは、ダストそのものが金属を腐食するというよりは、ダストの付着により水分が吸着されやすくなったり、亜硫酸ガスなどの腐食性ガスが吸着されることにより腐食が促進されるというケースが多い。表3.4－ 4 は、わが国主要地区における亜硫酸ガスの濃度についての結果を示したものであるが、これらの値から都市ならびに工業都市周辺における腐食状態が推察されよう。

表 3.4－ 3　大気汚染物質の発生源

工　　程	エアロゾル	ガス、および蒸気
燃焼	ダスト、フューム	NO_2、SO_2、CO、有機物、酸類
自動車エンジン	フューム	NO_2、CO、酸類、有機物
石油精製	ダスト、ミスト	SO_2、H_2S、NH_3、CO、炭化水素類、メルカプタン類
化学操作	ダスト、ミスト	工程に応じて SO_2、CO、NH_3、酸類、有機物、溶媒など
加熱炉、電気炉	ダスト、フューム、フューム、飛沫	SO_2、CO、ふっ化物、有機物（ダストとして Fe_2O_3 など）
金属精錬	ダスト、フューム	SO_2、CO、ふっ化物、有機物
食品および飼料加工	ダスト、ミスト	悪臭性物質

表3.4－ 4　わが国主要都市の降下煤塵量と亜硫酸ガス測定例
（ 昭和 37 年 10 月～ 38 年 9 月）

地域名	都市名	降下煤塵量（ton/km2・月）			亜硫酸ガス濃度（ PbO_2 法）（SO_3mg/cm2・day）		
		最　高	最　低	平　均	最　高	最　低	平　　均
北海道	札　　幌	30	11	21	0.51	0.18	0.32
	苫小牧	3	1	3	－	－	－
	帯　　広	18	6	14	－	－	－
	釧　　路	54	15	33	－	－	－
岩　　手	釜　　石	72	13	31	－	－	－
宮　　城	仙　　台	11	6	8	－	－	－
千　　葉	千　　葉	14	9	11	0.42	0.14	0.28
埼　　玉	川　　口	15	7	12	－	－	－
京　　浜	東　　京	40	7	11	1.81	0.15	0.83
	川　　崎	48	10	26	8.02	0.79	3.52
	横　　浜	61	6	23	2.90	0.21	0.91
中　　京	名古屋	20	10	13	3.32	0.87	1.78
	四日市	21	4	14	1.69	0.10	0.51
阪　　神	大　　阪	61	7	11	2.07	0.64	1.20
	境	19	7	19	1.42	0.70	1.14
	尼　　崎	31	10	13	4.20	0.33	2.05
	西　　宮	15	7	18	－	－	－
	神　　戸	18	7	10	2.06	0.69	1.29
兵　　庫	姫　　路	21	8	12	0.48	0.15	0.32
山　　口	徳　　山	16	9	13	0.86	0.30	0.55
	宇　　部	40	8	11	0.81	0.16	0.56
	小野田	57	8	17	0.82	0.18	0.51
北九州	門　　司	53	10	22	0.81	0.20	0.51
	小　　倉	28	12	17	1.07	0.35	0.70
	八　　幡	75	13	25	1.47	0.27	0.63
	戸　　畑	20	13	18	1.38	0.84	1.14
	若　　松	46	11	20	1.83	0.54	1.09
福　　岡	大牟田	43	17	25	1.52	0.39	0.98

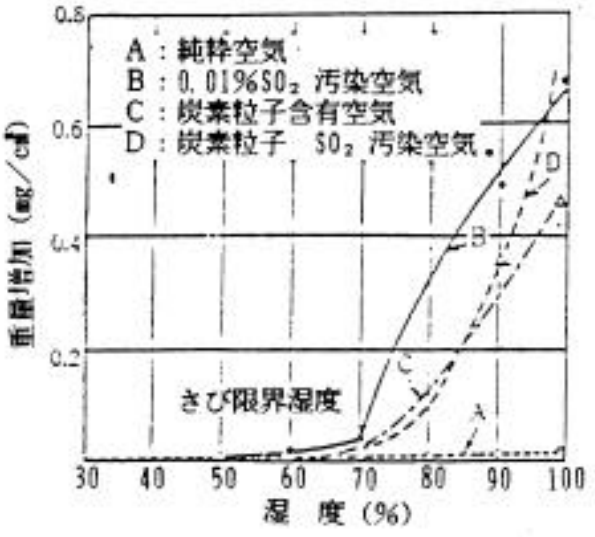


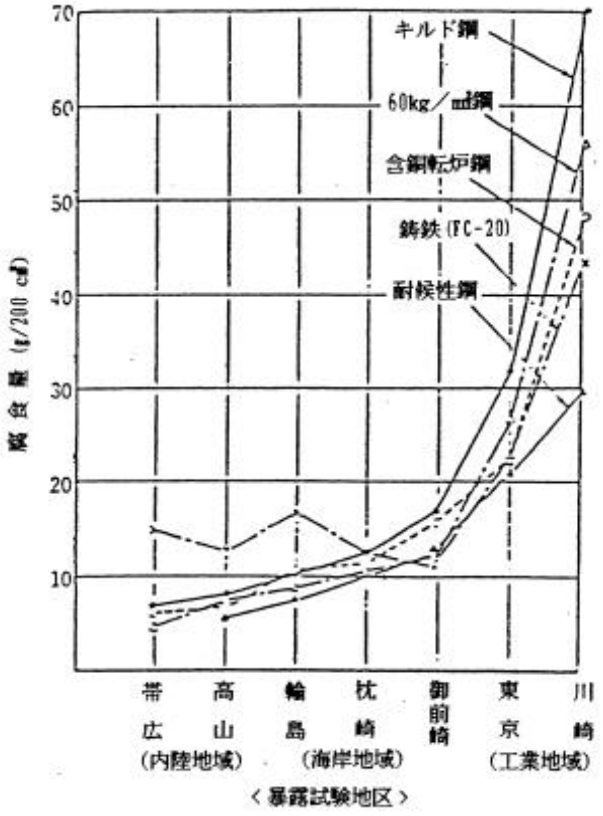
図3.4－ 1 湿度と亜硫酸ガスが鉄の腐食度に及ぼす影響

大気腐食においても最も問題視されるガスは亜硫酸ガスである。亜硫酸ガスが金属を腐食させる機構については、いろいろな説があるが、その中でも最も常識的に考えられることは、亜硫酸ガス（SO_2）が空気中の酸素で酸化されてSO_3 となり、これが水に溶けて硫酸となる（$SO_3+H_20=H_2SO_4$） ことである。鉄の表面に硫酸が付着すれば激しく反応するであろうことは想像にかたくない。しかし、実際の鉄は亜硫酸ガスの多い大気にさらしてもそれほど激しい腐食反応は生じない。希硫酸液中の反応から比較すれば、その速度は比較にならぬほど緩慢なものである。その理由は、鉄の腐食反応は前項で述べたとおり液体としての水と酸素の存在下で行なわれるのが原則であるから、大気腐食のように乾／ 湿が繰返される環境においては、腐食反応の大部分は湿の状態にあるときに行なわれるためと考えられる。

したがって、亜硫酸ガスの腐食への影響は、鉄表面の“ しめり” 状態によって変わるものである。図3.4－ 1 はイギリスのVernon[8)]によって亜硫酸ガスと鉄の腐食に及ぼす湿度との関係を求めた結果を示したものであるが、相対湿度70% で急速に腐食度が大きくなることを報告している。

図3.4-2 [9)]は5 ヶ年間の曝露試験結果を曝露環境別に示したものである。

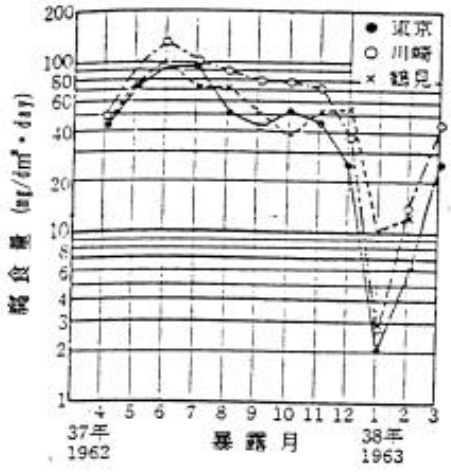
これらの腐食傾向は図 3.4-3 と同様に工業地帯では腐食量が急激に大きくなっている 大気汚染の状況は、地域、時期により、大きく異なる。環境庁の調査による全国の測定局の年平均値の単純平均値の年度別推移を、SO_2、NO、NO_2 について図 3.4-4 に示す。[7)]この値は、全国の単純平均値であるため、宇宙機を製造する工場がある工業地帯ではこれよりかなり高い値を示し、逆に種子島等では低い値を示すことが予想される。



〈曝露試験地区〉

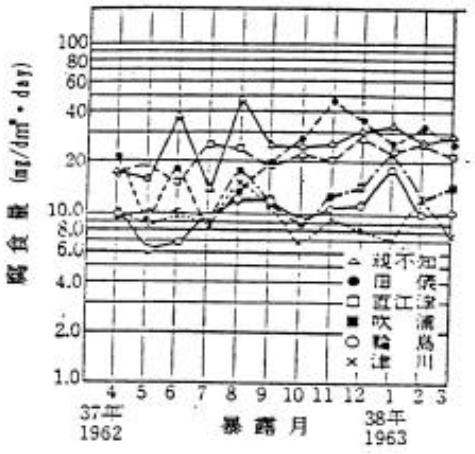
図3.4－ 2　各種鋼材の地区別大気腐食量比較図

（ 曝露期間昭和 35～ 40 年）



曝露月

図3.4-3(1/2)　工業地帯における各月の軟鋼の腐食傾向



曝露月

図3.4-3(2/2)　日本海岸地域における各月の軟鋼の腐食傾向

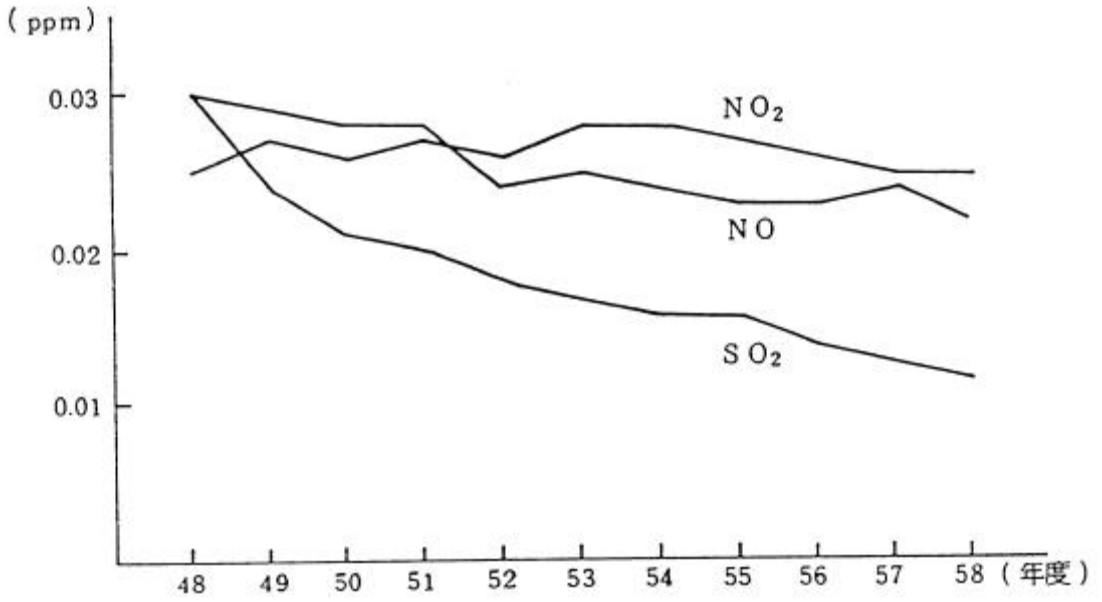


図 3.4－ 4　腐食性ガス濃度年平均値推移

(2) 腐食性ガスによる腐食

大気中の腐食性ガスの中で特に問題となるのはSO_2 である。SO_2 は空気中の酸素で酸化されてSO_3 となり、これが水に溶けて硫酸となって金属を腐食させる。

したがって、腐食性ガスによる腐食は水分、即ち湿度と大きな関係を持っている。

図3.4－ 5 はSO_2 による鉄の腐食と湿度との関係を示したものである。

これから、湿度 70% 以上で腐食度が、急速に大きくなることがわかる。また逆に、湿度を低く保てば、腐食性ガスによる腐食を避けることができる。

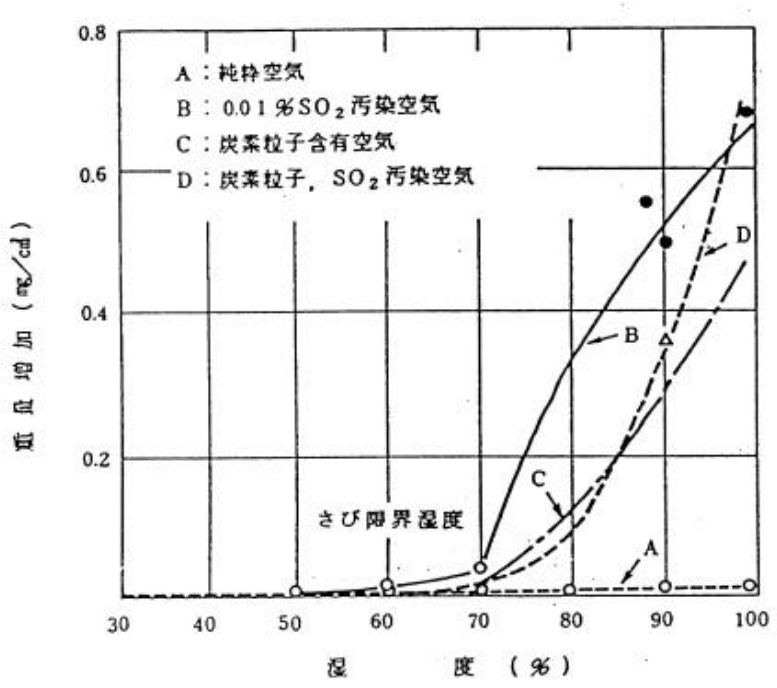


図 3.4－ 5　湿度と SO_2 が鉄の腐食度に及ぼす影響

3.4.3.3 推奨値

(1) 設計時の注意事項

腐食性ガスによる腐食を避けるため、宇宙機及びその搭載機器は、適切な材料選択及び保護手段を取る必要がある。金属の表面の保護処理は、MIL-STD-889 [9]に各金属毎に有効な方法が示されている。

(2) 基準とその説明

(a) 基準

宇宙機及びその搭載機器の設計にあたっては、SO_2、NO、NO_2 等の腐食性ガスによる腐食を生じないよう、材料選択、表面処理を考慮すること。

(b) 基準の説明

大気汚染の状況は地域、時期によって大きく異なるため、一般の基準として値を設定するのは困難である。

したがって、大気汚染の基準としては、特に値を設定せず、考慮すべき腐食性ガスの種類等を示すだけにとどめた。

なお、宇宙機は打上げ前の全期間を通じて空調された環境におかれるため、大気汚染に関して厳しい基準を設けることは妥当で無い。また、打上後の軌道上において大気汚染の影響を考慮する必要が無いのはもちろんである。

参考文献

(1) 日本学術振興会編； 金属防蝕技術便覧新版、（ 昭和47 年） 、日刊工業新聞社.
(2) 井上真由美：電子部品・材料に対するカビの作用、電子通信学会信頼性研究会資料 R69-3(1969-05)，1969 年5 月.
(3) 井上真由美： プラスチックの微生物抵抗性、工業材料、Vol.26, 2, 1978 年2 月.
(4) MIL-STD-454H, Standerd General Requirements for Electric Equipment 1982.
(5) ASTM G-21-70, Standerd Practice for Determining Resistance of Synthetic Polymeric Materialto Fungi, 1980.
(6) JIS Z 2911、かび抵抗性試験方法、1981.
(7) 環境庁： 昭和59 年度公害の状況に関する年次報告、（ 昭和59 年） ，pp199-205.
(8) 日本学術振興会編： 金属防蝕技術便覧 新版、（ 昭和47 年），pp205-215 日刊工業新聞社.
(9) MIL-STD-889B, Dissimilar Metals, 1976.

3.5.　雷

本項については以下の設計基準を参照のこと。
・耐雷設計基準（JERG-1－001）

3.6.　（欠番）

４．誘導環境

4.1 概　　要

地上における誘導環境は、宇宙機及びその搭載機器の製造、試験、ハンドリング時の環境と、これらの荷扱い、輸送時の環境とに大別される。これら環境として考慮すべき主要項目は次の通りである。

(a) 製造、試験、ハンドリング時の環境
　　温度、湿度、気圧、清浄度、加速度、衝撃
(b) 荷扱い輸送時の環境
　　振動、衝撃、温度、湿度

本項においてはこれら各環境条件について米国等の公共規格や標準での規定の例(付録Aに示す)と、最近の宇宙航空研究開発機構のプログラムでの実際の要求の例(付録Bに示す)とを比較検討し、併せて今後のプログラムに対する推奨値の例(4.2項)を示す。

製造、試験の実施時の環境条件は、特別の要求のある場合を除き常温、常圧、常湿と一般に言われているが、これら環境が機器の性能／ 寿命に影響を及ぼす可能性のある場合、これらを厳密に規定する必要がある。宇宙機システムにおいては、これら規定の厳密化の傾向が顕著であり、特にロケット、宇宙機とも固体モータ、火工品及び蓄電池等に対しては厳密な規定が設定されている。

一方荷扱い、輸送時の環境は米国の軍規格MIL-P-116G 等[1)2)3)]の要求をベースとしてきたが、これらは過酷なフィールド環境下での運用をも想定したものであり、今日の宇宙機及びその搭載機器に対する要求としては必ずしも妥当とは言えない面もある。宇宙機器としての特殊性から見て、また最近の実際のフィールドデータの蓄積結果等から見て、より緩やかな条件を採用することの妥当性も考えられる。NASA SP-8077 [4)]

等がこれらの為の参考となる。

4.2 推　奨　値

4.2.1 製造、試験、ハンドリング環境

製造、試験、ハンドリング時の環境は、機器がその環境下において性能／ 寿命の低下を来たす可能性あるいは外観異常等を生ずる可能性の有無によって定められている。

一般に衛星プログラムでは、特別に厳しい管理を必要とする場合を除き、下記の値が望ましい。

温　　度　：15～ 30℃
相 対 湿 度　：60% 以下
圧　　力　：900ｈPa～1053ｈPa（675～790mmHg）
清　浄　度　：ISO 14644-1 クラス８[5]（Fed.Std.209B クラス10 万）

定 常 加 速 度　：各軸±3G
作業台上での衝撃　：機器の設計要求としては規定しない。

ロケットプログラムでは上記のような要求を設定することは必ずしも実際的でなく、各システム又は機器の性能／ 寿命及び外観要求等に応じて設定されるべきである。しかしながら搭載電子機器等のように温度、湿度や清浄度にクリティカルな機器やそのシステムに対しては、上記の値が参考になろう。

4.2.2 荷扱い及び輸送環境

(1) 振動及び衝撃

荷扱い及び輸送時の振動、衝撃は、その環境条件が宇宙機又はその搭載機器の設計にインパクトを与えるものであってはならない。適切なコンテナ設計と作業方法によってこれら機器の安全が確保されるべきである。宇宙機器の振動、衝撃等の実際のデータは国内ではまだ体系的に整理されるに至っていない。しかし交通機関の状況や取扱い方法は国内と米国等とで大差のないこと、及び二、三の実測データでもこれを裏付けていることから、MIL-P-116G 等の厳しい条件よりも、NASA SP-8077 等の値を採用する方法が妥当と考えられる。一例を下記に示す。

荷扱い時の衝撃…… 高さ8cm からのエッジ接地落下（ 参考文献4） の2.2.2.5 項

参照）

輸 送 時 の 振 動…… 図Ａ－４に示す“ Continuous” 条件（ 表Ａ－１４、表Ａ－１５ が参考となる）

輸 送 時 の 衝 撃…… 3.2G 又は表Ａ－９に示す値

なお予め輸送手段が特定できる場合（ 鉄道輸送の削除等） 、該当要求項目を絞った要求とすることが望ましい。

(2) コンテナ外部の温度、湿度、圧力

温度は輸送、取扱いの実施地域、輸送手段等により、次のように設定するのが望ましい。

国内（関東地方等）：－10～＋40℃
国 内 寒 冷 地：－25～＋40℃
空調のない航空機：－40～＋65℃

最高温度に関しては直射日光の影響をも考慮する必要があろう。

湿度及び圧力は次の値が望ましい。

相 対 湿 度：最大100％
圧 力：117～1040ｈPa(88～780㎜Hg)
（地上～高度15㎞相当）

(3) コンテナ内機器の温度、湿度、圧力

コンテナに収容された機器が（2）の条件に耐えられない場合、適切なコンテナ設計により、温度、湿度、圧力を保持すべきである。

参考文献

(1) MIL-P-116G Preservation-Packaging, Method of.
(2) Fed. Method Std.101B Preservation, Packaging and Packing Materials , Test Procedure.
(3) Fed.Std.209B Clean Room and Work Station Requirements, Controlled Environment.
(4) NASA SP-8077 NASA Space Vehicle Design Criteria：Transportation and Handling Load.
(5) ISO 14644-1 Cleanrooms and associated controlled environments- Part1 ： Classification of airborne particulates.

付録Ａ　公共規格、標準等の規定の例

Ａ．１ 公共規格、標準等の規定の例

(1) 製造、試験、ハンドリング環境

製造、試験及びハンドリング時の環境の主要規定事項としては、温度、湿度、気圧と清浄度がある。これらは宇宙機及びその搭載機器の製造、試験等の各段階を通じて良好な機能／ 性能を維持し、かつ測定結果を適切に評価するために必要な条件として定められている。温度、湿度及び気圧の規定の例を表Ａ－１ に示す。表Ａ－１ に引用した各規格では清浄度については特に規定していないが、電子機器等の精密機器の組立、試験時には通常ISO14644-1クラス８ [12](Fed.Std.209B [3]のクラス10 万)程度が要求される。

表　Ａ－1　試験実施場所の環境要求の例

規　定 / 項　目	MIL-STD-1540A [8]	GSFC S-320-G-1 [11]	MIL-STD810D [5]	同　左 [5] (厳密に制御)	NDS C 0110 C [7]
温　度〔℃〕	23±10	25±3	23±10	23±1.3	20±2
気　圧〔mmHg〕	610～775	室内の周囲圧力	650～775	650～775	685～810
相対湿度〔%〕	50±30	55 以下	50±30	50±5	65±5

(2) 荷扱い及び輸送環境

荷扱い及び輸送時の主要環境条件としては、宇宙機又はその搭載機器がコンテナに収容された状態で遭遇する衝撃（ 荷扱い時の輸送時） 、振動、温度及び湿度がある。これらに対する規定の例を下記に示す。

(a) 荷扱い時の衝撃

荷扱い時に機器に作用する衝撃としては、落下（ 自由落下、エッジ接地落下、コーナ接地落下）と衝突がある。MIL-P-116G[1]ではコンテナの品質保証の一手段であるRough Handling Tests の試験条件として、これらの各試験の実施を規定し（ 関連文書 [1]のTABLEⅢ ） 、各試験方法はFed. Test Method Std.No.101B [2]のMethod 5005、

5007、5008、5020 等を適用している。表Ａ－ 2 に示す衝撃レベルはロケット及びその搭載機器に多く適用されている例であるが、この値は上記の各Method のLevel B 試験（ 取扱い、輸送時の良好な条件が期待できる場合） 要求にほぼ同等である。

表Ａ－ 2　荷扱い時の衝撃レベル（ 注）

梱包重量 (kg)	縁長又は直径(cm)	自由落下 (コーナ)	接地落下 (エッジ)	接地落下 (コーナ)	衝　　突
		落　下　高（ cm）			速度（ km/h）
～22.5	～90	50	－	－	－
22.5～45	～120	41	－	－	－
45～67	～150	36	－	－	－
67～90	～150	31	－	－	－
90～270	～180	－	68	68	8
270～1,350	制限なし	－	46	46	8
制限なし	制限なし	－	23	23	8

（ 注） 関連文書 [10] の第2 章2.1.1 項(11)より

NASA SP-8077 では宇宙機器の取扱いで発生する衝撃の可能性の典型として、Saturn S-IV プログラムで発生した取扱いミスによる高さ7.62cm（ 3 inch）からのエッジ接地落下を挙げている。

作業者の荷役による衝撃は包装故障の最大の原因となる。この荷扱条件は貨物質量・体積に影響される。わが国及び米国での標準的な基準を表Ａ－３示す。

表Ａ－３　質量・容積別の荷扱（ 荷扱頻度： ％ ）

荷扱種別および荷扱相当落下高度（ cm）	質　量　別（ kg）			容　積　別（m^3）		
	20kg 以下	20-50kg	50kg 以上	0.1m^3以下	0.1m^3-0.2m^3	0.2m^3以上
腰から下： 30cm	40	36	30	45	10	42
腰から下： 60cm	45	30	20	33	35	
肩から下： 80cm（腰を曲げる）	8	12	10	10	10	
肩から下： 120cm	7	22	40	12	45	58

貨物総質量（ kg）	貸物の最大寸法（cm）	荷扱条件	試験落下高（cm）
10 以下	120	1 人荷役	105
10～ 25	90	〃	90
25～ 50	120	2 人荷役	60
50～ 75	150	〃	53
75～ 100	150	〃	45
100～ 300	150	機械荷役	30
300～1.500	－	〃	－23
1.500 以上	－	〃	15

（ 本表は精度上、1 ポンド≒ 0.5 kg 、1 インチ≒ 2.5cm とした。）

わが国では商品貨物が落下した場合、内容物に発生する衝撃の大きさを次のように表わしている。

$G=$ （ 5.4±1.7） $\times h^{0.58}$　　但し、h： 落下高さ（cm）

これらのことから、わが国における商品貨物の流通間に内容物に発生した最大衝撃を測定整理した結果では、

1. 高　値　$GH=801\times W^{-0.704}$.
2. 中央値　$GM=203\times W^{-0.396}$
3. 低　値　$GL=53.2\times W^{-0.100}$

但し、GH、GM、GL＝ 流通間に貨物内容物に発生した最大衝撃（G）

W＝ 貨物質量（ kg ）

W については作業者荷役に対するものであるため25≦W≦ 100 kg とする。又、100kg以上の貨物については100kg として求める。

物品の易損度の規定としては商品の緩衝包装の目安として、防衛省規格では、表Ａ－４のように与えられている。

表Ａ－４　物品の易損度（G）

品　　名	易損度（ G）
大型電子計算機	10 以下
ミサイル、水晶発振器、高級電子機器、精密測定機器、航空計器	15～25
大型電子管、周波数変換装置、精密指示計器、電子機器、大型産業機器	20～40
小型電子計算機、レジスタ、大型送信機、大型テープレコーダ、カラーテレビ、一般計器、航空機装備品	40～60
テレビ、テープレコーダ、カメラ、真空管、電球、光学機器、ステレオ、移動無線装置、1.8*l* びん、魔法びん、冷蔵庫	60～90
携帯無線装置、ラジオ、小型置時計、ビールびん	90～120
機械類、小型真空管、一般機材、陶磁器	120 以上

荷扱い荷重は作業者の訓練と慎重さによって負荷荷重は大巾に緩和される。宇宙機の荷扱いに関しては作業が事前の計画に従って、緊密にモニターされながら、作業者が十分訓練され、注意して作業を行うため、大巾に低くなる。

その例として、ポラリスモータのトラック／ 鉄道への積換え時、

鉛直衝撃1.3G 40msec

鉛直振動1.3G 10Hz

サターン S-IV ステージのクレーン／ ケーブルシステム

最大鉛直加速度　0.6 G

がある。

但し、一度クレーン操作中にビークルの前縁が7.62cm 落下して0.94G の加速度を生じた。

3.05m 直径固体ロケットモータ

最大加速度　0.22 G 軸方向

0.10 G 鉛直方向

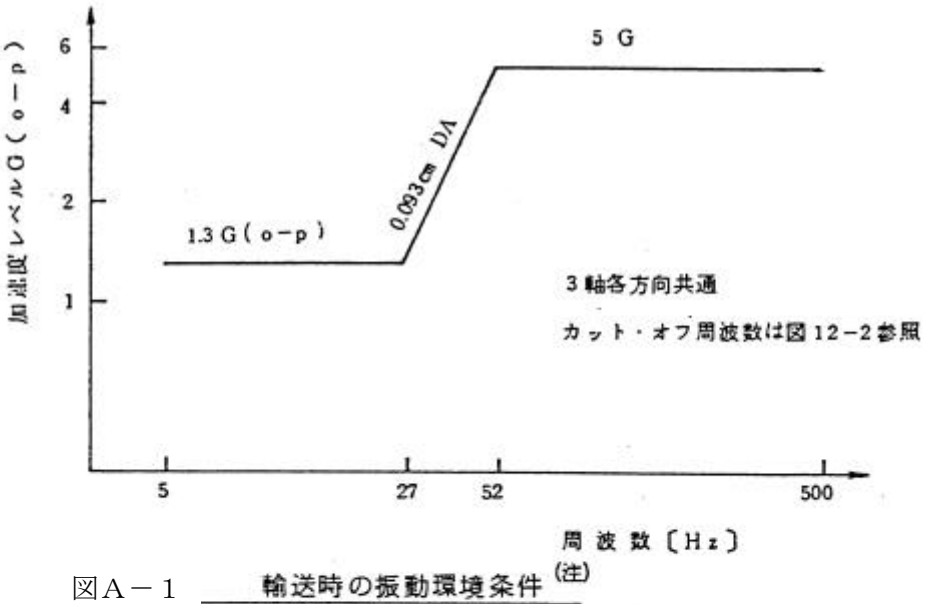
0.20 G 横方向

等が文献で与えられている。

(b) 輸送時の振動

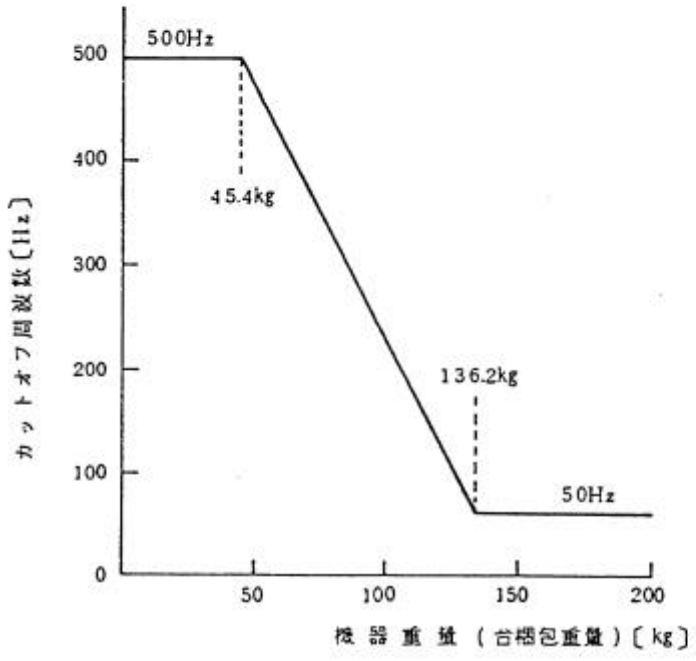
輸送時の振動は輸送手段によって周波数及び振動レベルに差が出てくる。図Ａ－１及び図Ａ－２に示す要求値は最大加速度が5G であり、極めて厳しいものになっている。一方MIL-STD-810C[5)]では表Ａ－５、図Ａ－３に示すように、5～ 200Hz の全周波領域にわたって、1.5G を規定している。

NASA SP-8077[4)]では航空機、船、鉄道及びトラックの各運送手段での実測データに基づいた振動レベルをまとめている。この結果を図Ａ－４ に示す。航空機を除く各輸送手段では定常状態の加速度は1G 前後、過渡状態（ 輸送時の衝撃に相当する）で約3G である。なお船による輸送時の振動は0.1Hz 程度までの低周波振動（ 動揺試験に相当）の影響が大きい。航空機の場合は高周波領域（ 250Hz 以上） で約8G の高いレベルになっている。荷扱い及び運送時における各種の膨大なデータを集積し解析した文献（ 資料[6)]） においても、その結果は図Ａ－４とほぼ同様の値を示している。



図Ａ－１　輸送時の振動環境条件(注)

(注)　参考文献[10]の第２章2.1.1項(9)より
（オリジナルは参考文献[2]のMethod 5020.1 Figure 1）



図Ａ－２　輸送時環境条件のカット・オフ周波数

表Ａ－５　　**輸送時の振動条件**(注)

Transport Mode	Procedure	Procedure Part Number	(図Ａ－３) Figure 514.2－7 Curve 5／	Applicable Test	Sweep Time 4／
Rail,air,sea,truck or semitrailer 1／	X		AW	Sinusoidal Cycling for 84 minPer Axis	12min 5－200－5 Hz
Any of above plus tracked vehicle 2／	X		AV	Sinusoidal Cycling for 84 minPer Axis	12min 5－200－5 Hz
Any of above plus 2－wheeled trailer 2／	X		AX	Sinusoidal Cycling for 84 minPer Axis	12min 5－200－5 Hz
Loose Cargo 3／	XI	2	See 4.6.12.2		

1／The normal transport of items as secured cargo, with land transport over paved roadways.

2／The transport of items as secured cargo to include land transport over paved roads unimproved roads and cross-country terrain.

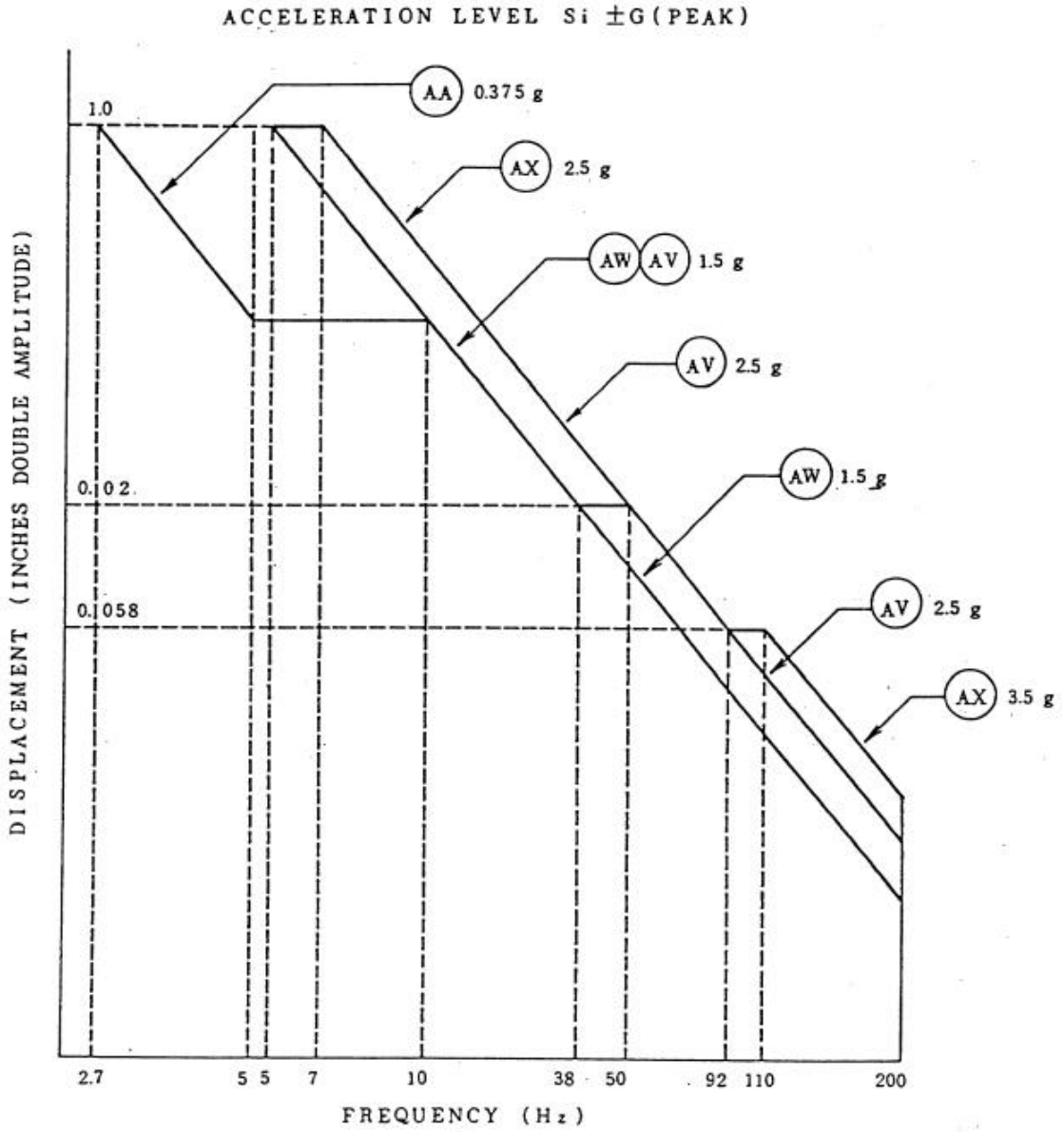
3／When transit case or combination case is provided for the test item the case shall be included in the test setup.

4／Sweep time may be 15 minutes if test requirements go to 2 Hz.

5／For vibration isolated items, curve AA is to be used in the lower frequency range (below 13Hz and the curve appropriate to the mode of transportation for the higher frequencies.

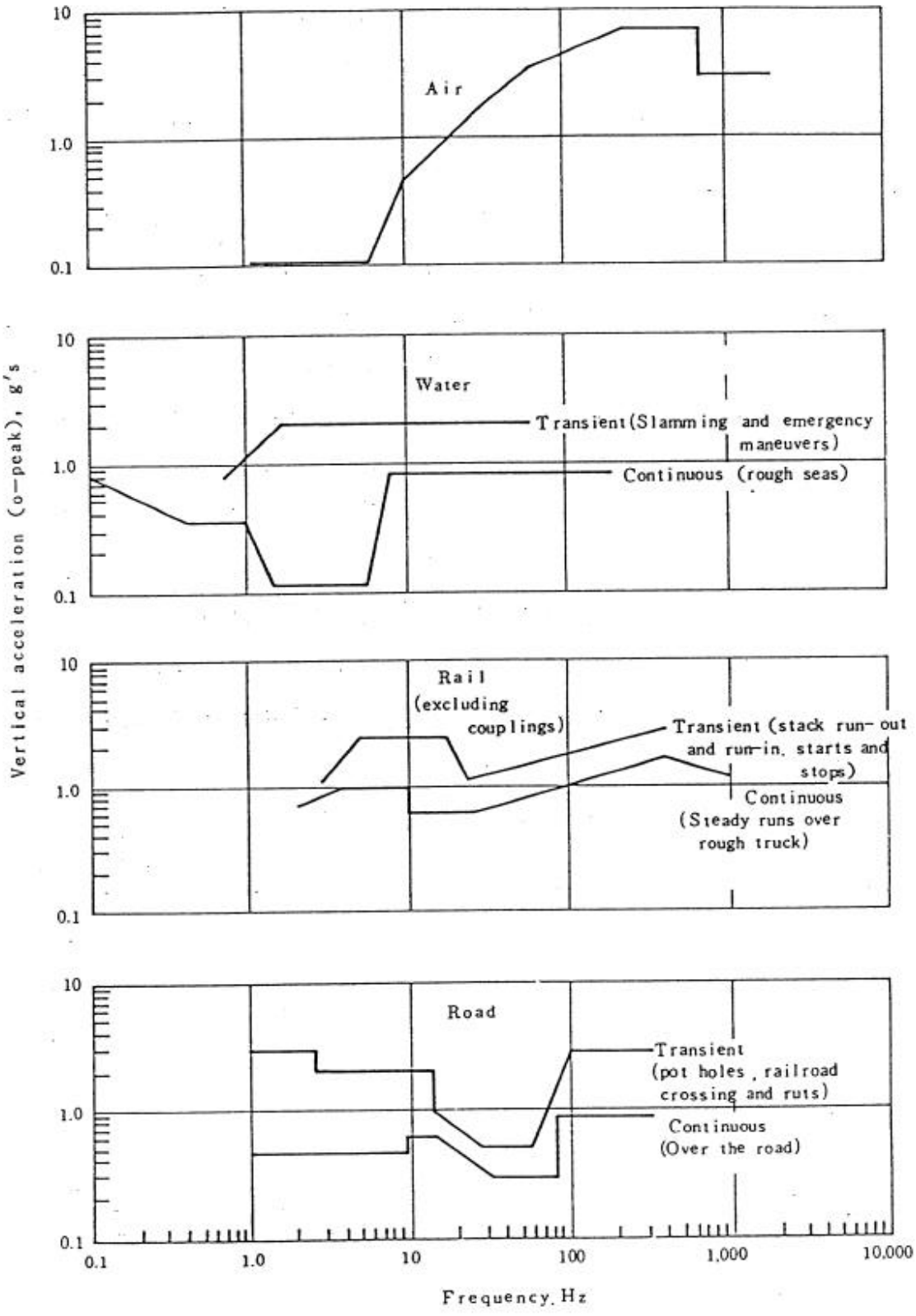
(注) 関連文書5)のTable 514.2－Ⅶより：ただしC 版

表Ａ－３参照



図Ａ－３　輸送時の振動条件（ 表Ａ－３ 関連）（注）

（ 注） 関連文献[5] のFigure 5.1.4.2-7（ ただしC 版）



図Ａ－４　各種輸送手段による振動環境（ 包絡値）（注）

（ 注） 関連文献[4] のFigure 2 より

輸送時の振動に関し、国内での実際の計測データに基づいた規定の例は少ないが、（ 資料7 ） では通常のトラック荷台の高速道路及び未舗装道路での振動レベルの実測値をベースに、試験条件を設定している。（ 資料7 ）の付図1～ 付図3）これによれば100Hz 以下では0.3G、200Hz では1.3G、また400～ 500Hz では最大3～5G 程度である。400～ 500Hz の振動レベルは衝撃に相当するものとみなされ、これらの結果は図Ａ－４ の値とほぼ同様といえる。

一般に路面凹凸は車の進行方向に対する不規則変動量としてパワスペクトルの形で表わされ、パワスペクトルP（ n） と単位長さ当りの波数（ 空間周波数） n との関係は指数函数となる。

ISO の規格案では高周波域、低周波域の二つの領域にわけ、

$$P(n) = P(no)\left(\frac{n}{no}\right)^{-W1} \qquad n \le no$$

$$P(n) = P(no)\left(\frac{n}{no}\right)^{-W2} \qquad n \ge no$$

但し、no＝ 1/2p（≒ 0.16）c/m

w1＝ 2、w2＝ 1.5

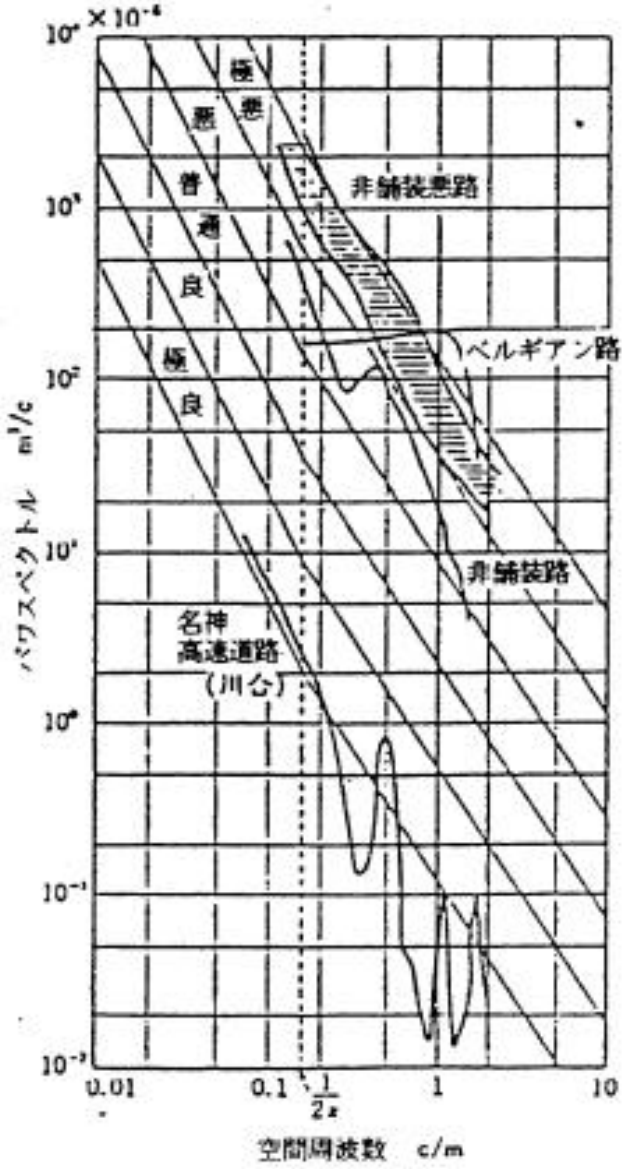
更に規格案では表Ａ－６ のように道路の凹凸の程度を5 段階に分類している。この規格案を実際の道路のデータと比較して図Ａ－５ に示す。

表Ａ－６　路面凹凸による分類

道路区分		P(no)の範囲	P(no)の（幾何学的）平均	w1	w2
A	極良	2～ 8	4	2	1.5
B	良	8～ 32	16	2	1.5
C	平均	32～ 128	64	2	1.5
D	悪	128～ 512	256	2	1.5
E	極悪	512～2048	1024	2	1.5

P(n)の単位は$10^{-6}m^3$/ c

n o は1/2x cycle/meter



図Ａ－５　路面凹凸のパワスペクトル表示

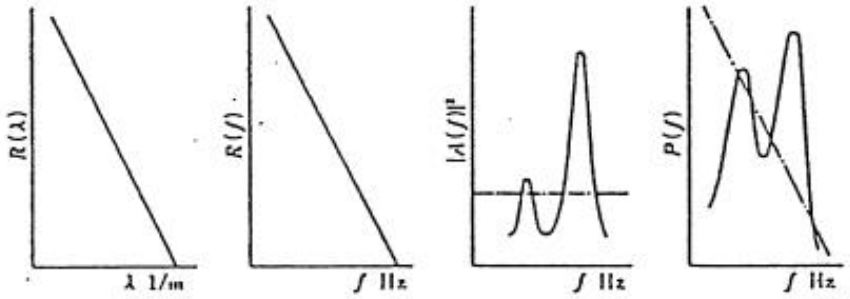
空間周波数n で表示した路面凹凸のパワスペクトルP（ n） と時間周波数f（Hz） で表わした値R（ f） との関係は走行車速をV（ m/s） として、

$$R(f) = \frac{1}{V} P\left(\frac{f}{V}\right)$$

となる。タイヤ端から先の車両側の周波数応答関数をA（ f） とすると、車両の振動のパワスペクトルS（ f） は、

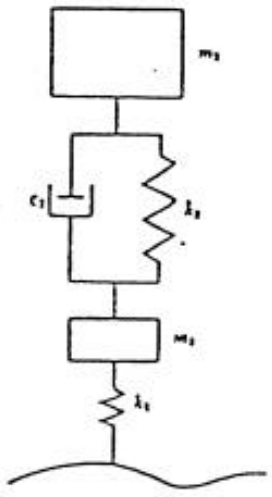
$$S(f) = |A(f)|^2 R(f)$$

により与えられる。（ 図Ａ－６ 参照）

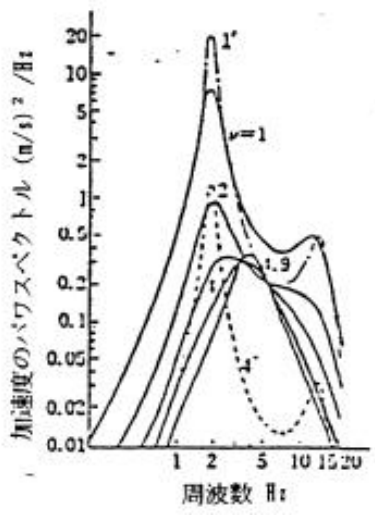


図Ａ－６　路面凹凸と車両の応答

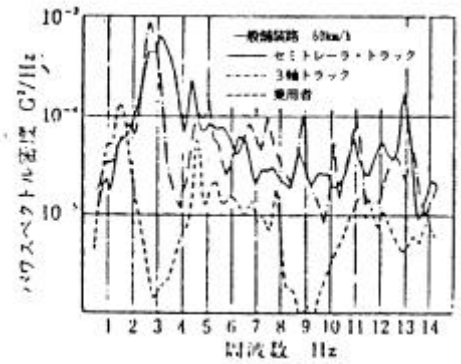
車両側の振動系は図Ａ－７に示した2 自由度振動系即ち2 質量（ ばね上m_2、 ばね下m_1） 、2 ばね（ 懸架ばねk_2、タイヤk_1） とダンパC_2 の振動系を考慮すると応答のパワスペクトルは図Ａ－８ のようになる。実際のセミトレーラ・トラクターの加速度応答例を図Ａ－９ および表Ａ－７に示す。



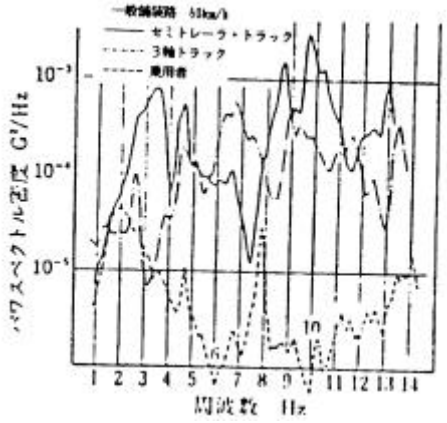
図Ａ－７　2 自由度振動系図



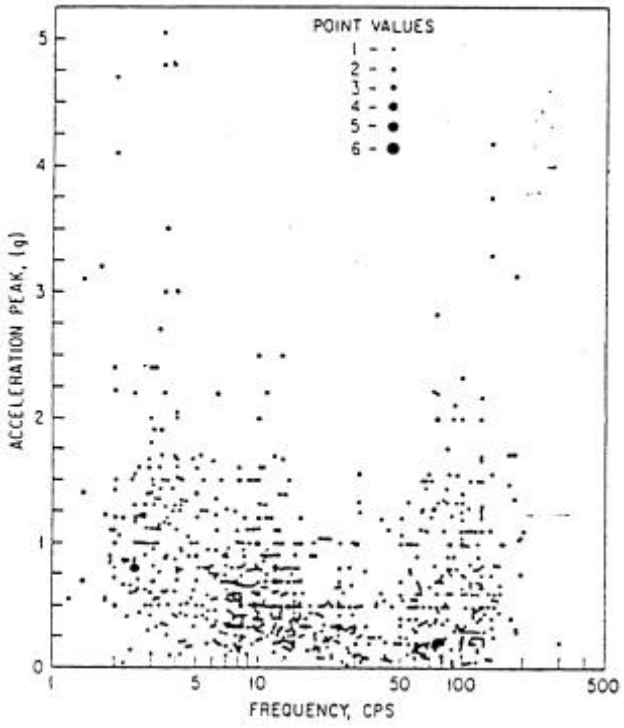
図Ａ－８　道のあらさによる応答の変化



図Ａ－９(a) セミトレーラ・トラクタの
上下方向加速度



図Ａ－９(b) セミトレーラ・トラクタの
前後方向加速度



図Ａ－９(c)　トラック及びトレーラの貨物部分の加速度の実測値 [8)]

表Ａ－７　$2\frac{1}{4}$トントラックのロードテストの貨物部の加速度 [8)]

Type of action	Max. acceleration, s				Frequency, cps
	Longitudinal	Lateral	Vertical	Vector total, σ	
Beaching	2.5	1.0	4.5	5.3	3.3
Ungraded road 48km/h(30mph)	0.5	1.0	1.5	1.9	
Graded road 48km/h(30 mph) ...	1.0	0.25	1.0	1.4	

船舶の励振に関する主要な項目は波浪と船体が波で持ち上げられて後にたたきつけられることで生じる“ スラミング” である。その他の船舶励振要因としては、

(1)プロペラ及びシャフトの不釣合、又はレシプロエンジンで生じる単周期励振

(2)不均一な後流中でプロペラが回転することによって生じる水力学的励振力の変動

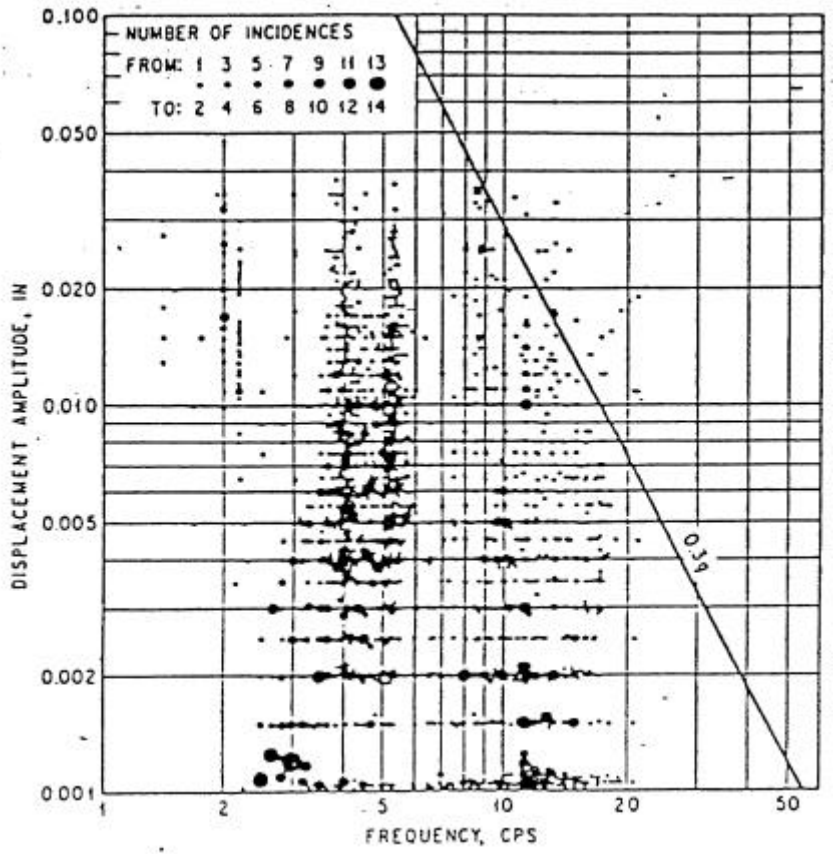
(3)荒海の中での波力変動

がある。

機械系及びプロペラによって生じる励振は一般にスラミング又は波浪による励振は波の形状、高さ及び波長の測定で決まり、その統計データは種々の文献に与えられている。[9)]

波浪及びインパルス荷重に対する船舶の応答は船舶の動的モデルを用いて解析され、種々の船舶は対する応答及びストレスレベルが求められている。

船舶輸送に対する環境レベルの設定は以上の励振入力から求めるよりも実際の船舶での輸送時の測定データを基にして設定する方法がとられている。種々の船舶で測定データは種々の文献に与えられているが[8)10)]、その一例を図Ａ－１０ に示す。



図Ａ－１０　種々の船舶の船体及びデッキ上下／ 横振動

大部分の測定はファンテール（ 船尾張出し部） であり、ここは船体の中で最も厳しい条件となる。即ち、この測定データは荷重の上限値を決めるのには有効である。

サターンs -Ⅳ ステージの船舶及びバージでの輸送中の測定データでは、測定した加速度の周期は4～ 10sec/cycle で、加速度成分は上下0.35g 以下、横方向0.15g 以下、前後方向0.15g 以下であった、バージでの海洋航行中、主たる環境はおだやかで、4～ 12秒周期の低レベル加速度であった。一度強風で8～ 10 フィートの波浪を生じ、バージの引索が波をたたき、バージ中の応答が9Hz で加速度レベルは上下方向で0.8g に達した。

(c) 輸送時の衝撃

輸送時の衝撃加速度は輸送手段によって一般に大きく異なったものになる。表Ａ－８はロケット及びその搭載機器に多く適用されてきた値であり、表Ａ－９ はNASA SP-8077 [4] に制限荷重ファクタとして設定されているものである。一般に前者の値の方がやや大きい。特に鉄道の場合は貨車連結時の衝撃は大きくなっている。

表Ａ－８　輸送時の衝撃加速度（ 注）

単位（G）

梱包重量（kg）	輸　送　方　法			
	鉄　道	トラック	航空機	船　舶
0～110	65（最大）	10	8	1.5
110～225	45（〃）	8	6	1.5
225～450	35（〃）	7	6	1.5
450～	20（〃）	6	5	1.5
持続時間（ ms）	10～50	8～40	8～40	0～40

注）　関連文書[2)]の第2 章2.1.1 項(10)より

表Ａ－９　輸送時の制限荷重ファクタ（ 注）

Medium mode	Longitudinal load factors G	Lateral load factors G	Vertical load factors
Water	±0.5		＋2.5
Air	±3.0		＋3.0
Ground			
Truck Rail (humping shocks)	±3.5		＋6.0
Rail (rolling)	±6.0 to±30.0	±2.0 to±5.0	＋ 4.0 to ＋ 15.0
Slow-moving	±0.25 to±3.0	±0.25 to＋0.75	＋0.2 to＋3.0
dolly	±1.0	±0.75	

（ 注）　関連文書[4)]のTable 1 より

(d) 貯蔵、輸送時の温度及び湿度

GSFC S-320-G-111)では、貯蔵温度及び湿度試験として表Ａ－１０ 及び表Ａ－１１に示す宇宙機設計認定条件が要求されている。ただし、これは地上支援装置等による保護がなされていない場合に対してのものである。文献[7)]では温度は具体的に規定してはいないが、相対湿度を最高95% としている。

表Ａ－１０　貯蔵温度試験（ 宇宙機設計認定）　（ 注）

低　　温		高　　温	
安定温度	時間	安定温度	時間
－30° C	6 時間	60° C	6 時間

注）　関連文書[11]　の表5 より

表Ａ－１１　湿度試験（ 宇宙機設計認定）　（ 注）

安定化された温度	相対湿度	時　間
30° C	95^{+0}_{-5}　% R. H.	24 時間

注）　関連文書[11]　の表 7 より

Ａ．２ 日本の宇宙プログラムでの規定の例

最近の宇宙航空研究開発機構のロケット、人工衛星及びその搭載機器の環境条件の規定の例を下記に示す。

(1) 製造、試験、ハンドリング環境

各プログラムでの要求の例を表Ａ－１２に示す。ロケット・プログラムと宇宙機プログラムでは大きな違いが見られる。ロケットでは、

温　　度　　：－ 18（ 又は－ 25）　～ ＋ 60° C
相　対　湿　度　　：95% 以下
圧　　力　　：地上～ 高度15km 相当
定 常 加 速 度　　：各軸±3G
作業台上での衝撃　　：表Ａ－１２ のNo.12 参照
を規定している。

一方,宇宙機では、いずれのプログラムでも全項目について規定している。代表例は次の通りである。

試 験 時 温 度　　：15（ 又は18）　～ 30° C
保 管 時 温 度　　：試験時に同じ又は　－ 10～ ＋ 40° C
相　対　湿　度　　：60% 以下（ 試験時、保管時共通）

気　　圧　：900(又は973)～1053hPa(675 (又は730) ～ 790 ㎜ Hg)
(試験時、保管時共通)
清　浄　度　：ISO 14644-1クラス8(Fed.Std.209Bクラス10万)又は
Fed.Std.209Bクラス30 万以下 (試験時、保管時共通)

(2) 荷扱い及び輸送環境

各プログラムでの要求の例を表Ａ－１３～ 表Ａ－１５ に示す。振動及び衝撃に関しては具体的な要求値を設定しているものと、具体的な要求値は設定せず、「打上げ上昇時の条件よりも十分小さいこと。」という規定にしているものがある。前者の場合はコンテナ外部に与えられる要求条件、後者はそのコンテナに収容された機器に対する要求条件である。前者の場合は更に、MIL-P-116G のRough Handling Test の要求等をベースにしたものと、NASA SP-8077 又はMIL-STD-810D をベースにしたものとに分けられる。

ロケット及びその搭載機器に対する要求はMIL-P-116G 等をベースにしたものであり、コンテナの設計にとって厳しい条件となっている。一方衛星及びその搭載機器に対する要求は、NASA SP-8077、MIL-STD-810D をベースにしている。宇宙機器の設計要求として妥当なものといえる。

温度、湿度及び圧力の規定は、コンテナ外部に対する要求とその内部に収容された機器に対する要求とに大別される。表Ａ－９ の例ではその双方を規定しているものと、どちらか一方のみを規定しているものとがある。コンテナ外部の温度に関しては、空調のない航空機による輸送の考慮の有無等により、その規定最低温度のバラツキが大きい。

表Ａ－１２　製造、試験、ハンドリング時の環境条件の例（1／6）

No.	プログラム名称	温　度	相対湿度	圧　力	清浄度	加速度	振動、衝撃	備　　考
1	ETS－V　衛星システム	〔° C〕	〔%〕	〔mmHg〕				
	・　動作時	＋15～＋30	60 以下	675～790	クラス 30 万			
	・　非動作時	－10～＋40	60 以下	675～790	クラス 30 万			
2	CS－3　衛星システム							
	・　製作、組立、試験時	＋18～＋30	60 以下		クラス 30 万	打上げ・上昇時及び軌道上の条件よりも十分小さいこと。		バッテリ及び火工品を除く
	・　保管時	＋18～＋30	60 以下		クラス 30 万			
3	MOS－1　衛星システム							
	・　作動時	＋15～＋30 25±3 を目標とする	60 以下	675～790	クラス 10 万			
	・　非作動時	－10～＋40	60 以下	675～790	クラス 10 万	各軸±3G 以下	衛星認定試験条件の50%以下	
4	BS－2　衛星システム	－40～＋65	100 以下	大気圧～高度 15km				
		上記環境から、環境調整付建屋、クリーンブース等により適切に保護されるものとする。						
5	EGP　衛星システム							
	・製作取扱時	－10～＋40	60 以下	730～790	クラス 10 万 目標	各軸±3G 以下	打上げ時に遭遇する衛星の環境を越えないよう、治具の設計、取扱方法を考慮すること。	
		－10～＋40	60 以下	730～790	製作取扱時と同等			

表Ａ－１２　製造、試験、ハンドリング時の環境条件の例（2／6）

No.	プログラム名称	温　度	相対湿度	圧　力	清浄度	加速度	振動、衝撃	備　　考
6	ETS－V　アポジモータ	〔°C〕	〔%〕	〔mmHg〕				
	・組立時	0～＋40	40～60					
	・保管時	本　体 0～＋40	60 以下					
		その他						
		－10～＋50	80 以下					
7	ETS－V　推薬タンク							
	・取扱時	＋15～＋30	60 以下（＊）	675～790	クラス 10 万			＊…推薬充填時は
	・保管時	－10～＋60	60 以下	675～790	クラス 10 万			40～60%
8	CS－3　通信用中継器							
	・保管時	＋16～＋35	70 以下	675～815				
9	CS－3　AKM	CS－3 衛星システムに同じ						
	・製作、組立、試験時							
	・保管時	－6～＋37	60 以下		クラス 30 万			
10	CS－3　バッテリ	CS－3 衛星システムに同じ						
	・製作、組立、試験時		60 以下		クラス 30 万			
	・保管時	－25～－10						
		長期保管						
11	MOS－1　可視近赤外放射計及び可視熱赤外放射計							
	・組立試験時	＋15～＋30	60 以下	730～790	クラス 10 万	各軸±3G 以上	打上げ時レベルの 50%	
		－10～＋40	60 以下	730～790	クラス 10 万		以下	

表Ａ－１２　製造、試験、ハンドリング時の環境条件の例（3／6）

No.	プログラム名称	温　度	相対湿度	圧　力	清浄度	加速度	振動、衝撃	備　　考
12	H－Ⅰ　1段組立 ・作動時 ・　非作動時、取扱時	〔°C〕 －25～＋49 －25～＋60	〔%〕 95 以下 95 以下	〔mmHg〕 地上～（＊） 高度 15km		各軸±3G	作業台上での衝撃（搭載機器） H＝10cm 又はα＝45 度のうちの低い方からの落下	＊…タンクには適用しない
13	H－Ⅰ　2段組立 ・　作動時（搭載機器） ・　非作動時（保管中）	0～＋33 －18～＋60	95 以下 95 以下	地上～高度 15km		各軸±3G	No.12 と同一要求	
14	H－Ⅰ　3段組立 （スピンテーブル） ・地上取扱い時	－18～＋61	95 以下	地上～高度 15km		各軸±3G		
15	H－Ⅰ　データ　インタフェースユニット ・作動時 ・保管時、非作動取扱時	0～＋33 －25～＋60	95 以下 95 以下	－ －		－	No.12 と同一要求	

表Ａ－１２　製造、試験、ハンドリング時の環境条件の例（4／6）

No.	プログラム名称	温　度	相対湿度	圧　力	清浄度	加速度	振動、衝撃	備　　考
16	H－Ⅰ　1段制御電子パッケージ	〔°C〕	〔%〕	〔mmHg〕				
	・取扱（作動）時	－25～＋49－	0～95				No.12と同一要求	
	・保管時	25～＋60	0～95					
17	H－Ⅰ　2段制御電子パッケージ							
	・取扱（作動）時	－25～＋49－	0～95				No.12と同一要求	
	・保管時	25～＋60	0～95					
18	H－Ⅰ　第2段エンジンLE－5	（＊）						
	・点検及び整備時	－18～＋60	95以下	海面上大気圧	適用しない	各軸±3G		＊　…機能点検時は0～33°C
	・貯蔵時	－18～＋6	MIL－STD－1540B電気系コンポーネント					

表Ａ－１２　製造、試験、ハンドリング時の環境条件の例（5／6）

No.	プログラム名称	温　度	相対湿度	圧　力	清浄度	加速度	振動、衝撃	備　　考
19	H－Ⅰ　2段ガスジェット装置	〔° C〕	〔%〕	〔mmHg〕				
	・地上取扱時	－25～＋60	95 以下				No.12 と同一要求 ただし、この規定は飛行中の衝撃レベルを越えるものではなく、これを越える場合は取扱い治具または取扱い方法を定めてレベルを越えないよう配慮のこと。	
		必要な場合内部保護を行なっても良い						

表Ａ－１２　製造、試験、ハンドリング時の環境条件の例（6／6）

No.	プログラム名称	温　度	相対湿度	圧　力	清浄度	加速度	振動、衝撃	備　　考
		〔° C〕	〔%〕	〔Pa(mmHg)〕				
20	準天頂衛星							
	製造、取扱時	15～30	20～60	90000　～ 105000 (675～790)	IS014644-1 Class8 準拠	クレーンによる 吊り上げ時 14.7m/S^2	N/A	
	保管時	-10～40	60 以下	同上	同上	N/A	N/A	
21	ＡＳＴＲＯ－Ｇ搭載機器	23±5	65% max		クラス 10 万			
22	ＰＬＡＮＥＴ－Ｃ搭載機器	23±5	65% max		クラス 10 万			
23	ＯＩＣＥＴＳ							
	試験環境	15～30	20～60		Fed. Std. 209 B クラス 10 万			
	保管環境	15～30	60%以下		同上	打上げ・上昇及び軌道上の条件よりも充分小さいこと。		

Ａ－１３　荷扱い及び輸送環境の例（1／4）

No.	プログラム名称	梱包箱に対する環境条件						内部の機器に対する環境条件			備　　考
		振　　動	衝　　撃	加速度	温度	相対湿度	圧力	温度	相対湿度	圧力	
1	ETS－V 衛星システム	MIL-STD-810　Method 513、514、516に示される環境であり、衛星の輸送、取扱いによって誘起される環境を考慮すること。 MIL-STD-810　Method 513、514、516に示される環境であり、衛星の輸送、取扱いによって誘起される環境を考慮すること。			－40～＋65	〔%〕 5～100	〔mmHg〕 大気圧 ～高度 15km	〔° C〕 －10～＋40	〔%〕 60 以下	〔mmHg〕 675～790	
2	CS－3 衛星システム				－40～＋65 中心値 19～25±2.8	最大 100	大気圧	＋5～＋35	60 以下		清浄度：クラス 30 万 （コンテナ内部）
3	MOS－1 衛星システム	表 A-10	表A-2 及び 表 A-10	各軸±4G	－10～＋40直射日光を考慮のこと。温度制御しない航空機では－40＋65	5～100	675～780 温度制御しない航空機では 88～780	－10～＋40	60 以下	730～790	
4	HS－2 衛星システム	MIL-STD-810　Method 513、514、516 に示される環境であり、衛星の輸送、取扱いによって誘起される環境を考慮すること。			－40＋65 （制御をしない場合）	5～100 （同左）	大気圧～高度 15km	適切に保護されること			
5	EGP 衛星システム	表 A-11	表 A-11	各軸±4G	－20～＋52	5～100	88～780	－10～＋40	60 以下	730～790	清浄度：製作取扱時と同等

表Ａ－１３　荷扱い及び輸送環境の例（2/4）

	プログラム名称	梱包箱に対する環境条件						内部の機器に対する環境条件			備　　考
		振　　動	衝　　撃	加速度	温度	相対湿度	圧力	温度	相対湿度	圧力	
						〔%〕	〔mmHg〕		〔%〕	〔mmHg〕	
6	ETS－V アポジモータ モータ本体 その他	 － －	 輸送時TBD 10G 以下	 －				 0～＋40 －10～＋50	 60 以下 95 以下		
7	ETS－V 推薬タンク	打上上昇時及び軌道上の条件より小さいこと（梱包箱内部）						－20～＋50	60 以下	80～790	清浄度： クラス 10 万
8	CS－3 通信用中継器				－30～＋60	90 以下	大気圧～ 高度 15km				
9	CS－3　AKM	CS-3 システムに同じ						－6～＋37	65 以下		
10	CS－3 バッテリ	CS-3 システムに同じ						0～＋30	65 以下		
11	MOS－1 可視近赤外放射計及び可視熱赤外放射計	打上げ時のレベルの50%以下 （コンテナ内部）						－10～＋40	60 以下	730～790	清浄度： クラス 10 万
12	H－Ⅰ　1 段組立	図 A-1	表A-2 及び 表 A-4		－25～＋60	95 以下	地上～ 高度 15km	１段が有害な影響を受けないよう、配慮するものとする。			
13	H－Ⅰ　2 段組立	図 A-1	表A-2 及び 表 A-4		－25～＋60	95 以下	地上～ 高度 15km	２ 段が有害な影響を受けないよう、配慮するも			

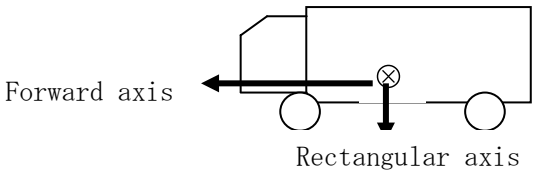
表Ａ－１３　荷扱い及び輸送環境の例（3/4）

No.	プログラム名称	梱包箱に対する環境条件						内部の機器に対する環境条件			備　　考
		振　　動	衝　　撃	加速度	温度	相対湿度	圧力	温度	相対湿度	圧力	
14	H－Ⅰ　3 段組立（スピンテーブル）	図A-1	表A-2 及び 表A-4		〔° C〕 －54～＋61	〔%〕 95 以下	〔mmHg〕 地上～ 高度 15km	スピンテーブルが有無な影響を受けないよう、配慮するものとする。	〔%〕	〔mmHg〕	
15	H－Ⅰ　データインタフェースユニット	図A-1	表A-2 及び 表A-4		－25～＋60	95 以下					
16	H－Ⅰ　1 段制御電子パッケージ	図A-1	表A-2 及び 表A-4		－25～＋60	95 以下		左記要求に対し、収納箱あるいは梱包の使用を前提として良い。			
17	H－Ⅰ　2 段制御電子パッケージ	図A-1	表A-2 及び 表A-4		－25～＋60	95 以下		左記要求に対し、収納箱あるいは梱包の使用を前提として良い。			
18	H－Ⅰ　第2 段エンジン　LE－5	図A-1			－54～＋61	MIL-STD-1540B （電気系機器）		取扱説明書に規定された容器、方法に従って輸送を行なうこと。			
19	H－Ⅰ　2 段ガスジェット装置	図 A-1	表A-2 及び 表 A-4		－54～＋60	95 以下					

表Ａ－１３　荷扱い及び輸送環境の例（4/4）

No.	プログラム名称	梱包箱に対する環境条件						内部の機器に対する環境条件			備　　考
		振　　動	衝　　撃	加速度	温度	相対湿度	圧力	温度	相対湿度	圧力	
					〔° C〕	〔%〕	[hPa(mmHg)]		〔%〕	[hPa]	
20	準天頂衛星	表Ａ-16 による	表 Ａ -16 による	直行３軸方向に 39.2m/S^2 以下	-40～65 (空輸の場合も含む)	5～100	120～1050 (90～790)				
21	ＡＳＴＲＯ－Ｇ搭載機器(注１)							-5～30	60% max	973～1053	
22	ＰＬＡＮＥＴ－Ｃ搭載機器(注１)							-5～30	60% max	973～1053	
23	ＯＩＣＥＴＳ	MIL-STD-810E METHOD 513,514, 516 に 示される環境であり、衛星の輸送、取扱いによって誘致される環境を考慮すること。			-40～65	～100					輸送環境については塩霧、菌類、砂塵、太陽照射、雨、爆発性雰囲気、圧力も規定

注１）衛星輸送時の振動／衝撃環境は、Forward axis ：31.4 m/s^{2}以下、Rectangular axis ：24.5 m/s^{2}以下。



表Ａ－１４　輸送時の振動及び衝撃レベル例（ その1)

	輸　送　の　形　態			
	自動車・船		航　空　機	
	周　波　数	加　速　度	周　波　数	加　速　度
振動レベル（正弦波）	1～ 9Hz	0.5 Go－p	1～ 6Hz	0.1 Go－p
	9～ 34Hz	0.7 Go－p	6～ 10Hz	0.5 Go－p
	34～ 85Hz	0.35 Go－p	10～ 20Hz	1.0 Go－p
	85～ 200Hz	0.9 Go－p	20～ 40Hz	2.0 Go－p
			40～ 700Hz	7.0 Go－p
			700～ 2000Hz	3.0 Go－p
衝撃レベル	3.2Go－p		適用せず	

表Ａ－１５　輸送時の振動及び衝撃レベル例（ その2)

	輸　送　の　形　態		
	陸　　路	海　　路	
振動レベル（正弦波）	周波数（ Hz）加速度（ Go－p)	周波数（ Hz）	加速度（ Go－p)
	5－10 0.33	1－7	0.4
	10－15 0.32	7－200	0.37
	15－23 0.26		
	23－100 0.23		
	100－200 0.45		
衝撃レベル	3.2Go－p	3.2Go－p	

表Ａ－１６　輸送時の振動及び衝撃環境

	全質量	輸送の形態			
		鉄道	トラック(注3) (舗装道路)	トラック (未舗装道路)	航空機
振動環境 (正弦波)		(x9.8m/s^2) (0-P)	(x9.8m/s^2) (0-P)	(x9.8m/s^2) (0-P)	(x9.8m/s^2) (0-P)
	0～25Kg 25～450Kg	5 4	6 5	10 8	5 4.5
	上限周波数 ｸﾘﾃｨｶﾙ周波数(注2)	200Hz 1.5～7.5Hz	200Hz 1～15Hz		2000Hz 60～250Hz
衝撃環境		(x9.8m/s^2) (0-P)	(x9.8m/s^2) (0-P)		(x9.8m/s^2) (0-P)
	0～100Kg 100Kg～200kg 200Kg～450Kg	65(max) 45(max) 35(max)	10 8 7		8 6 6
	衝撃レベルの持続時間	10～50msec	8～40msec		0.8～40msec

注１）　全質量とは、輸送用コンテナも含む数値である。

注２）　クリティカル周波数とは､輸送時に主として発生する周波数のことであり、搭載機器を内蔵した輸送用コンテナの固有周波数は、クリティカル周波数を避けること。

注３）　海上輸送はフェリーによるものとし、トラックと同等のレベルと見なす。

参考文献

(1) MIL-P-116G Preservation-Packaging, Method of.

(2) Fed. Method Std.101B Preservation, Packaging and Packing Materials , Test Procedure.

(3) Fed.Std.209B Clean Room and Work Station Requirements, Controlled Environment.

(4) NASA SP-8077 NASA Space Vehicle Design Criteria：Transportation and Handling Load.

(5) MIL-STD-810D Environmental Guidlines and Test Methods（注：本文中一部引用はC 版による）

(6) General Technical Report FPL 22 An Assessment of the Common Carrier Shippling Environment.

(7) NDS C 0110C 防衛省規格：電子機器の運用条件に対する試験方法.

(8) Harris & Crede“Shock and Vibration Handbook Vo13”McGraw-Hi11 1961.

(9) Jasper N. H. ; Statistical Distribution Patterns of Ocean Waves ad of Wave Induced Ship Stress and Motion, with Engineering Application. David taylov Model Basin Rept.92 Oct 1975.

(10) Ostrem .F. E. and Rummerman. M. L. ; Transportation Shock and Vibration Design Criteria Manua1.Vo1 1, Regort MR-1262. Genral American.

(11) GSFC S-320-G-1 General Environmental Test Specification for Spacecraft and Components（宇宙航空研究開発機構文書 TE-000002）.

(12) ISO 14644-1 Cleanrooms and associated controlled environments- Part1 ： Classification of airborne particulates.